

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie**

**Vysokoposuvové frézování hliníkových a titanových slitin**

**High-Feed Milling of Aluminium and Titanium Alloys**

Student:

Bc. Martin Gazda

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petruš, Ph.D.

Ostrava 2016

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Gazda**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **2303T002 Strojírenská technologie**  
Specializace: **20 Strojírenská technologie**  
Téma: **Vysokoposuvové frézování hliníkových a titanových slitin**  
**High-Feed Milling of Aluminium and Titanium Alloys**

Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu řešené problematiky.
2. Experimentální metodika a experimentální ověření.
3. Zhodnocení dat a diskuze výsledků.
4. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentální metody v tržskovom obrábění*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 973-80-8070-711-8.
- [5] WHITNEY, Daniel E. *Mechanical Assemblies : Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2004. 518. p. ISBN 0-19-515782-6.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: **11.12.2015**

Datum odevzdání: **16.05.2016**



  
doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

## Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....14.5.2016.....

.....  


podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: .....14.5.2016.....



Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Martin Gazda

Adresa trvalého bydliště:

Svatobořice-Mistřín

992/33

69604

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

GAZDA, M. *Vysokoposuvové frézování hliníkových a titanových slitin: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 76 s. Vedoucí práce: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petru, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá problematikou vysokoposuvového frézování hliníkových a titanových slitin. V teoretické části je zahrnuto všeobecné vysokoposuvové frézování, vlastnosti hliníkových a titanových slitin, frézovacích nástrojů, moderních praktických aplikací této technologie a jsou zpracované řešerše k podobným experimentům. Experimentální část diplomové práce je zaměřena na porovnání metod sousledného a nesousledného frézování titanové slitiny UNS R56260, a to z hlediska drsnosti povrchu a velikosti řezných sil při procesu obrábění. V závěru práce jsou prezentovány naměřené hodnoty drsnosti  $R_a$  a  $R_z$  a řezné složky  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ . Efektivita obrábění záleží na správné volbě řezných podmínek.

## ANNOTATION OF MASTER'S THESIS

GAZDA, M. *High-Feed Milling of Aluminium and Titanium Alloys: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2016, 76 p. Thesis head: Assoc. Prof. Jana Petru, Ph.D., multi MSc. M.A.

The Master thesis deals with problems High-feed milling of aluminium and titanium alloys. The theoretical part concerns high-feed milling, properties of aluminium and titanium alloys, milling tools, progressive practical applications of this technology and there is compiled research to similar experiments. The experimental part is focused on comparing methods down-milling with up-milling titanium alloy UNS R56260, from the point of view of surface roughness and size of cutting forces during the machining process. In the final part the measured values of surface roughness  $R_a$  and  $R_z$  and cutting force components  $F_x$ ,  $F_y$  and  $F_z$  are presented. Efficiency of machining depends on right choice of cutting conditions.

# OBSAH

<b>OBSAH.....</b>	<b>- 1 -</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>- 4 -</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>- 7 -</b>
<b>1 Analýza současného stavu vysokoposuvového frézování .....</b>	<b>- 8 -</b>
1.1 Vlastnosti hliníku a jeho slitin .....	- 9 -
1.2 Nástroje pro frézování hliníkových slitin .....	- 9 -
1.3 Obrábění hliníkových slitin .....	- 10 -
1.4 Moderní obrábění hliníkových slitin.....	- 11 -
1.5 Produkty z hliníkových slitin vyrobené metodou vysokoposuvového frézování .....	- 12 -
1.6 Rešerše řešené problematiky pro hliníkové slitiny .....	- 13 -
1.6.1 Rešerše k experimentu: Predikce sil a kvality opracování při frézování s vysokými posuvy .....	- 13 -
1.7 Vlastnosti titanu a jeho slitin .....	- 15 -
1.8 Obrábění titanových slitin.....	- 15 -
1.9 Zásady při frézování titanových slitin .....	- 16 -
1.10 Moderní obrábění titanových slitin.....	- 17 -
1.11 Rešerše řešené problematiky pro titanové slitiny .....	- 17 -
1.11.1 Rešerše k experimentu: Obrábění titanových a těžkoobrobitelných slitin frézováním.....	- 18 -
1.11.2 Rešerše k experimentu: Predikce sil a kvality opracování při frézování s vysokými posuvy titanové slitiny Ti6Al4V .....	- 19 -
1.12 Metody frézování .....	- 21 -
<b>2 Experimentální metodika a experimentální ověření.....</b>	<b>- 22 -</b>
2.1 Rešerše vysokoposuvového frézování hliníkové slitiny .....	- 23 -
2.2 Obráběná titanová slitina UNS R56260.....	- 24 -

2.3	Obráběcí stroj.....	- 25 -
2.4	Obráběcí nástroj pro slitinu titanu UNS R56260.....	- 26 -
2.4.1	Vyměnitelné břitové destičky pro slitinu titanu UNS R56260 .....	- 26 -
2.5	Řezné podmínky pro slitinu titanu UNS R56260 .....	- 27 -
2.5.1	Příklad teoretického výpočtu: .....	- 28 -
2.6	Použité měřidla pro experiment.....	- 30 -
2.6.1	Drsnoměr SURFTEST SJ-210 .....	- 30 -
2.7	Dynamometr Kistler 9129AA.....	- 31 -
<b>3</b>	<b>Zhodnocení dat výsledků experimentu .....</b>	<b>- 32 -</b>
3.1	Vyhodnocení dat drsnosti povrchu .....	- 32 -
3.1.1	Označení vzorků titanové slitiny UNS R56260 .....	- 33 -
3.1.2	Tabulka zaznamenávání a počítání parametrů drsností $Ra$ a $Rz$ .....	- 34 -
3.1.3	Testování hodnot podezřelých na zatížení hrubou chybou .....	- 34 -
3.1.4	Stanovení nejistoty měření .....	- 37 -
3.1.5	Řezné parametry a průměrné hodnoty výběru měřených parametrů drsnosti $Ra$ a $Rz$ při sousledném frézování .....	40
3.1.6	Nejmenší naměřená drsnost při sousledném frézování a její rozšířená kombinovaná nejistota měření $U_C$ .....	41
3.1.7	Řezné parametry a průměrné hodnoty výběru měřených parametrů drsnosti $Ra$ a $Rz$ při nesousledném frézování .....	43
3.1.8	Nejmenší naměřená drsnost při nesousledném frézování a její rozšířená kombinovaná nejistota měření $U_C$ .....	44
3.1.9	Porovnání parametrů drsnosti $Ra$ a $Rz$ v podélném směru měření při sousledném a nesousledném frézování titanové slitiny .....	46
3.1.10	Porovnání parametrů drsnosti $Ra$ a $Rz$ v příčném směru měření při sousledném a nesousledném frézování titanové slitiny .....	47
3.1.11	Dosažené výsledky hodnocení povrchu slitiny titanu UNS R56260.....	48
3.2	Vyhodnocení naměřených dat řezných sil .....	49
3.3	Vyhodnocení řezných sil titanové slitiny UNS R56260.....	50

3.3.1	Označení vzorků titanové slitiny UNS R56260 pro vyhodnocení řezných sil .....	50
3.3.2	Sousledné frézování titanové slitiny UNS R56260.....	51
3.3.3	Vyhodnocené složky řezné síly $F_y$ , $F_x$ a $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,25$ [mm] při sousledném frézování .....	52
3.3.4	Vyhodnocené složky řezné síly $F_x$ , $F_y$ a $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,4$ [mm] při sousledném frézování .....	53
3.3.5	Vyhodnocené složky řezné síly $F_x$ , $F_y$ a $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,6$ [mm] při sousledném frézování .....	54
3.3.6	Nesousledné frézování titanové slitiny UNS R56260.....	55
3.3.7	Vyhodnocené složky řezné síly $F_x$ , $F_y$ a $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,25$ [mm] při nesousledném frézování.....	56
3.3.8	Vyhodnocené složky řezné síly $F_x$ , $F_y$ a $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,4$ [mm] při nesousledném frézování.....	57
3.3.9	Vyhodnocené složky řezné síly $F_x$ , $F_y$ a $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,6$ [mm] při nesousledném frézování.....	58
3.3.10	Grafické porovnání sousledného a nesousledného frézování titanové slitiny UNS R56260 .....	59
3.3.11	Dosažené výsledky hodnocení řezných sil pro slitinu titanu UNS R56260 .....	62
<b>4</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>Přílohy .....</b>	<b>69</b>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	tažnost [%]
CAM	Common Access Method (Společná přístupová metoda)
CBN	polykrystalický kubický nitrid bóru
CNC	Computer Numerice Control (číslicové řízení pomocí počítače)
CVD	ChemicalVapourdeposition (nanášení povlaků chemickým způsobem)
ČSN	česká státní norma
D	průměr frézy [mm]
$D_1$	řezný průměr nástroje [mm]
$D'$	vnější průměr VBD [mm]
$D_1'$	vnitřní průměr VBD [mm]
E	modul pružnosti v tahu [MPa]
EN	evropská norma
F	výsledná řezná síla [N]
$F_c$	složka řezné síly [N]
$F_f = F_y$	síla ve směru posuvu [N]
$F_{fn} = F_x$	síla normálová k síle posuvu [N]
$F_p = F_z$	síla pasivní [N]
HB	tvrdost dle Brinella [-]
HFM/ HFC	High Feed Milling/ Cutting (vysokoposuvové frézování)
HSC/ HSM	High Speed Cutting/ Milling (vysokorychlostní obrábění/ frézování)
HSS	High Speed Steel (rychlořezná ocel)
HV	tvrdost podle Vickers [-]
L	celková délka nástroje [mm]
NC	Numerical Control (číslicové řízení stroje)
P	tlak [ $N \cdot mm^2$ ]
PKD	polykrystalický diamant
PVD	PhysicalVapourDeposition (nanášení odpařením z pevné fáze)
Q	množství odebraného materiálu [ $cm^3 \cdot min^{-1}$ ]
$Ra$	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [ $\mu m$ ]

$R_m$	pevnost v tahu [ $N \cdot mm^{-2}$ ]
RO	rychlořezná ocel
$R_z$	největší výška profilu [ $\mu m$ ]
SK	slinuté karbidy
TiAlN	titan – aluminium nitrid
TiC	karbid titanu
TiCN	karbonitrid titanu
TiN	nitrid titanu
$U_C$	rozšířená kombinovaná nejistota měření [ $\mu m$ ]
UNS	unifikovaný číselný systém
VBD	vyměnitelná břitová destička
W	šířka VBD [mm]
$Z_{1MAX}$	max. odchylka j-tého zdroje nejistoty vlivu opěrné patky drsnoměru [ $\mu m$ ]
ZU	počet zubů
$a_e$	šířka záběru frézy [mm]
$a_p$	hloubka řezu [mm]
d	montážní průměr ze strany stroje/montážní velikost [mm]
$d_l$	kontaktní průměr ze strany stroje [mm]
$f_n$	posuv na otáčku [mm]
$f_z$	posuv na zub [mm]
$h_{ex}$	maximální tloušťka třísky [mm]
$h_m$	střední tloušťka třísky [mm]
$k_u$	koefficient rozšíření při stanovení rozšířené nejistoty [-]
$k_c$	měrná řezná síla [MPa]
l	délka VBD [mm]
n	otáčky [ $min^{-1}$ ]
$n_i$	počet měření
$s(x)$	směrodatná odchylka [mm]
t	tloušťka VBD [mm]
$u_A$	standardní nejistota typu A [ $\mu m$ ]
$u_B$	standardní nejistota typu B [ $\mu m$ ]
$u_{B1}$	nejistota vlivu opěrné patky snímacího hrotu [ $\mu m$ ]
$u_{B2}$	nejistota měřicího přístroje [ $\mu m$ ]

$u_c$	kombinovaná standardní nejistota [ $\mu\text{m}$ ]
$v_c$	řezná rychlost [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]
$v_f$	rychlost posuvu [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]
$x_i$	označení měření
$\varepsilon_r$	nástrojový úhel špičky [ $^\circ$ ]
$\kappa_{r_s}$	úhel nastavení hlavního ostří [ $^\circ$ ]

# Úvod

Diplomová práce je zaměřena na vysokoposuvové frézování hliníkových a titanových slitin. Vysokoposuvové frézování je moderní metoda vysokorychlostního úběru materiálu pomocí vysokých posuvů nástroje. Tato metoda zkracuje výrobní časy a je stále více preferována v sériových a hromadných výrobach. Pro vysokou produktivitu u této technologie je nutné optimalizovat obráběcí proces. Možnosti každé technologie jsou omezeny, ale při neustálém vývoji nových technologií je možné neustále tyto hranice posouvat.

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na problematiku vysokoposuvového frézování, řešení podobných experimentů, vlastností titanu a jeho slitin, procesu obrábění titanových slitin, modernímu praktickému využití této technologie, metodám frézování a řezným silám při frézování.

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na vysokoposuvové čelní frézování titanové slitiny UNS R56260. Cílem experimentu bylo vyhodnocení a porovnání řezných sil pomocí dynamometru Kistler 9129AA a drsnosti pomocí drsnoměru SURFTEST SJ - 210, při sousledném a nesousledném frézování, podle navržených řezných parametrů. Experiment byl proveden v laboratoři Vysoké školy báňské, Fakulty strojní, Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie na frézovacím centru DMU 50.

V závěru práce jsou shrnuty vyhodnocené hodnoty drsnosti a řezných sil naměřené při vysokoposuvovém čelním frézování pro slitinu titanu UNS R52260. Dále jsou uvedeny nejvhodnější řezné parametry, při kterých dochází k nejmenšímu zatížení nástroje a nejlepší drsnosti povrchu při sousledném nebo nesousledném frézování.

# 1 Analýza současného stavu vysokoposuvového frézování

Technologie vysokoposuvového frézování je moderní metoda založena na rychlém úběru materiálu pomocí vysokých posuvových rychlostí. Tato metoda vyžaduje moderní CNC obráběcí centra, kde je věnována pozornost jednotlivým uzlům, které zabezpečují bezchybný chod stroje a přesné polohování obrobku a nástroje. Pomocí vysokých posuvů  $f_z = 3$  [mm] a malé hloubce záběru  $a_p = 2$  [mm] dochází k výraznému odfrézování materiálu v podobě tenké až drobné třísky za jednotku času. Oproti konvenčním metodám je až třikrát rychlejší. Jde o vysokoproduktivní metodu, při které můžeme dosáhnout úběru materiálu až  $Q = 1400$  [cm<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>]. Při tomto druhu obrábění je potřebné dodržet i určité zásady NC programování a mít kontrolu nad vysokým zrychlením nástroje ve všech osách pohybu. Technologii HFC můžeme využít pro rovinné frézování a frézování osazení, operaci zapichování, zajiždění pod úhlem a frézování spirálovou interpolací, frézování tvarově složitých odlitků, výkovků a forem pro strojírenství, energetiku, automobilový průmysl, dopravní a manipulační techniku. Tato metoda vyžaduje správnou volbu řezných nástrojů, které musí být robustní a s velkou zubovou mezerou. Vyměnitelné břitové destičky musí být s pozitivní geometrií čela. Tyto vlastnosti snižují řezné síly, čímž se zvyšuje životnost nástroje. Stabilitu řezné operace a snížení vibrací zajišťuje výsledná síla obrábění, která směřuje do vřetene stroje. Vysokoposuvovým frézováním se provádí hrubovací tak i dokončovací operace. Pro metodu HFC není nutné použití procesních médií, jelikož vyšší teplota třísky je pozitivním faktorem vysokoposuvového frézování, protože odfrézovaná tříska odvádí většinu vzniklého tepla z řezného procesu. Při dosažení určité řezné rychlosti přestane růst teplota řezné části nástroje, čímž můžeme zvýšit řezné podmínky a celkovou produktivitu frézovacího procesu, aniž by došlo k většímu opotřebení nástroje. S vývojem moderních technologií se přešlo ze silového obrábění, které bylo založené na tuhých strojích a robustních nástrojích, směrem k vysokorychlostnímu obrábění, pro které je typické zkrácení kontaktní zóny styku třísky s nástrojem, rychlejší odvod tepla z řezného procesu pomocí třísky, snížení řezných sil, zvýšení přesnosti obrábění a kvality obráběného povrchu [5] [9].

## 1.1 Vlastnosti hliníku a jeho slitin

Hliník a jeho slitiny jsou lehké, pevné, trvanlivé a snadno recyklovatelné. Stále více průmyslových odvětví využívá slitiny hliníku jako hlavní surovinu pro jejich výrobu. Slitiny hliníku jsou tvořeny z řady prvků, jako jsou: měď, hořčík, křemík, zinek, mangan, atd. Měď zvyšuje odolnost proti korozi, snižuje tvárnost a zvyšuje tvrdost a pevnost. Hořčík zlepšuje odolnost proti korozi, zvyšuje pevnost a dále zajišťuje vytvrditelnost. Obrobitelnost hliníkových slitin nám určuje především obsah křemíku.

Hliníkové slitiny mají hustotu  $2,6 \div 2,8 \text{ [g}\cdot\text{cm}^{-3}\text{]}$ , což odpovídá přibližně třetině hmotnosti oceli. Díky své nízké hmotnosti jsou slitiny hliníku hojně využívány v automobilovém průmyslu. Dále se hliníkové slitiny vymezují vysokou mezí pevnosti, a to až  $530 \text{ [N}\cdot\text{mm}^{-2}\text{]}$ . Odolnost vůči korozi je typická vlastnost hliníku. Náchylnost na korozi se vyskytují u slitin s vyšším obsahem mědi, naopak prvky jako jsou hořčík a mangan dodávají slitinám vyšší odolnost proti korozi. Výborná tvářitelnost hliníkových slitin umožňuje výrobu produktů při použití tvářecích technik za tepla i za studena. Dle typu hliníkových slitin můžeme zajistit vysokou elektrickou a tepelnou vodivost pro daný výrobek. Tvrdost hliníkových slitin je poměrně nízká a jejich třískové obrábění je obtížné [18].

## 1.2 Nástroje pro frézování hliníkových slitin

Moderní nástroje pro frézování hliníkových slitin jsou nástroje s definovanou geometrií břitů, které jsou z polykrystalického diamantu. Tyto nástroje se řadí mezi supertvrdé řezné materiály. Uplatňují se tam, kde SK pracují na hraně svých možností [9] [10].

Podle dlouhodobých zkušeností je lepší pro frézování hliníkových slitin zvolit nástroje s řeznými hranami z polykrystalického diamantu a tělo nástroje ze SK. Tato kombinace nástroje PKD a slinutého karbidu zajišťuje větší tuhost, nízké vibrace, menší opotřebení a až 3x větší životnost než nástroje s tělem ocelovým [10].

Použitím nástrojů z PKD se sníží počet výměn nástroje a tím se zrychlí výrobní takt, čímž se zvýší ekonomika obrábění. Optimální řezná rychlost se liší podle druhu obráběné slitiny. Z hlediska řezných rychlostí dosahují tyto nástroje až  $v_c = 8000 \text{ [m}\cdot\text{min}^{-1}\text{]}$  oproti nástrojům z rychlořezné oceli, které dosahují řezných rychlostí  $v_c = 400 \text{ [m}\cdot\text{min}^{-1}\text{]}$ .

Každá slitina má totiž své specifické vlastnosti. Dále záleží i na typu výroby. Pokud je výroba zaměřena na vysoký takt výroby, tak je lepší zvyšovat posuvové rychlosti, například technologií vysokoposuvového frézování. Každý proces obrábění vyžaduje své specifické podmínky s ohledem na požadované vlastnosti procesu a jejich vyladěním lze dosáhnout velkých úspor. Používání řezných nástrojů z PKD je stále více rozšířené a upřednostňované kvůli svým ekonomickým výhodám [10].

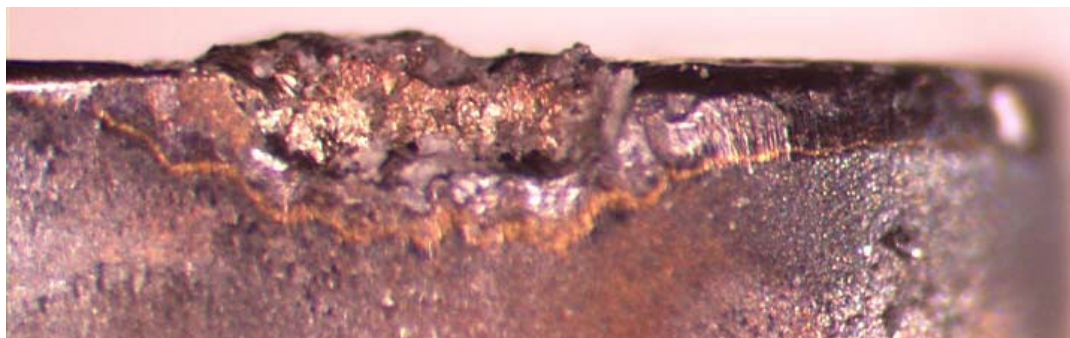
Podle kvality opracovávaného povrchu, složitosti obráběných ploch a typu výroby se rozhoduje, zda zvolit nástroj z PKD, nebo nástroj ze slinutého karbidu. Z hlediska kvality obrobeného povrchu lze nástrojem z PKD dosáhnout přesnosti až na tisíce milimetru. Nástroji s řeznými břity z polykrystalického diamantu lze obrábět i složité tvary [10].

### 1.3 Obrábění hliníkových slitin

Třískové obrábění vzhledem k vlastnostem hliníkových slitin patří mezi problémové obrábění. Je nutné vytvořit vhodné pracovní podmínky hlavně z hlediska vhodných řezných nástrojů, pozitivní ostré řezné hrany břitu, obráběcích strojů a volbě optimálních řezných podmínek. Problémy vznikají díky vysoké tepelné vodivosti hliníku a náchylnosti k adhezi většiny řezných materiálů. Díky vysoké tepelné vodivosti dochází ke značnému přechodu tepla z místa řezu do obrobku, což má za následek tepelnou deformaci obrobku.

Dalším problémem při frézování hliníkových slitin je nalepování hliníku na řezný nástroj, což znamená tvorbu nárůstku, viz Obr. 1. Tvorba nárůstku vzniká za nízké teploty a při vysokých tlacích. Mezi čelem nástroje a třískou z materiálu vzniká velká třecí síla a dochází k efektu navařování. Nárůstek je tvořen plasticky zdeformovanými částicemi obráběného materiálu a má za následek změnu geometrie nástroje. Tím dochází k nerovnoměrnému odebírání materiálu, čímž se zvýší drsnost obráběné plochy a zhoršuje se kvalita obrobené plochy. Nárůstek způsobuje kmitání soustavy stroj - nástroj - obrobek. Velikost a vlastnosti nárůstku lze eliminovat změnou řezných podmínek, použitím vhodné procesní kapaliny a povrchovou úpravou nástroje, jako je například lapování, leštění nebo aplikování kluzné vrstvy na břit nástroje s nízkým koeficientem tření. Vyšší životnosti nástroje se dosáhne při použití vyšších řezných rychlostí. Udává se maximální hodnota tloušťky třísky  $h_{ex} = 0,10 \div 0,20$  [mm] z důvodu tvorby otřepů, což nepříznivě ovlivňuje

životnost nástrojů. Je vhodné frézovat na strojích s pokročilou diagnostickou funkcí pro řízení dráhy nástroje, aby se předešlo rozměrových nepřesností při obrábění [1].



Obr. 1 *Tvorba nárůstku [1]*

## 1.4 Moderní obrábění hliníkových slitin

Ke zvyšování produktivity jsou využívány moderní metody obrábění. Jedná se o vysokorychlostní metody obrábění v kombinaci obrábění za sucha při relativně malém opotřebení břitu a velké životnosti nástroje. Tyto metody jsou využívány v hromadné výrobě, a to hlavně v automobilovém a leteckém průmyslu [12].

Vysokorychlostní a vysokoposuvové frézování hliníkových slitin jsou inovativní technologie se zaměřením na produktivitu výroby, kdy dochází k rychlému odběru materiálu. Snahou těchto technologií je snížit náklady, zvýšit objem výroby a dodržet požadovanou kvalitu. Základními řeznými parametry jsou vyšší otáčky vřetene a vyšší posuvové rychlosti. Tyto technologie potřebují pro dosažení svých vysokých řezných parametrů stroje, které tyto požadavky splňují. Jedná se především o moderní CNC stroje a jejich správného naprogramování. Tyto stroje musí zajistit staticko-dynamickou tuhost procesu frézování. Kvalitu obrobenej plochy ovlivňuje především zvolený řezný nástroj, řezné podmínky a celková dynamika chování celé soustavy [11].

Metoda HFM je z hlediska programování řezného procesu složitější než konvenční obrábění, ale pro samotnou výrobu se celkový čas zkrátí až několikanásobně. Tato metoda umožňuje vyrábět velmi složité a přesné výrobky s vysokou kvalitou povrchu. Vhodným zavedením metody vysokoposuvového obrábění do technologického postupu výroby, tak jako to udělala firma Audi s vačkovou hřídelí do motoru, vysoce zefektivní výrobní proces, viz Obr. 2. Ve strojírenském průmyslu je výroba forem velmi důležitou částí. Pomocí HFC metody a univerzálních CNC obráběcích strojů lze vyrobit i složitější formy

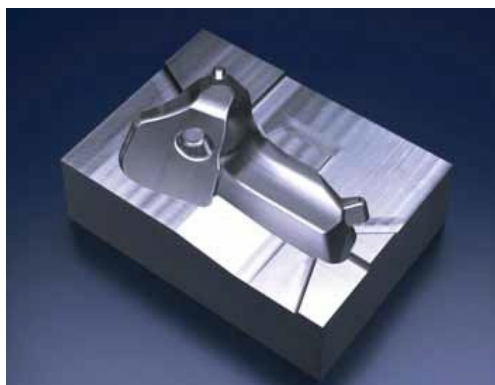


pro odlévání, a to za několikanásobně kratší čas, než při konvenčním obrábění, viz Obr. 3. Možnosti vysokoposuvového obrábění jsou do určité míry omezeny, ale pomocí neustálého vývoje této technologie tato metoda zvládne i výrobu složitých výrobků, jako je například motocyklová helma, viz Obr. 5. [9].

## 1.5 Produkty z hliníkových slitin vyrobené metodou vysokoposuvového frézování



Obr. 2 *Skládaný vačkový hřídel*



Obr. 3 *Forma vyrobená metodou HFC*



Obr. 4 *Blok motoru*



Obr. 5 *Motocyklová helma*

## 1.6 Rešerše řešené problematiky pro hliníkové slitiny

K teoretické části vysokoposuvového frézování hliníkových slitin je zpracovaná rešerše s podobným experimentem, který byl proveden v diplomové práci.

### 1.6.1 Rešerše k experimentu: Predikce sil a kvality opracování při frézování s vysokými posuvy

Tento experiment byl řešen v rámci diplomové práce na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství, Ústavu strojírenské technologie. V teoretické části diplomové práce je popsána analýza silového zatížení a kvalita opracování povrchu při frézování.

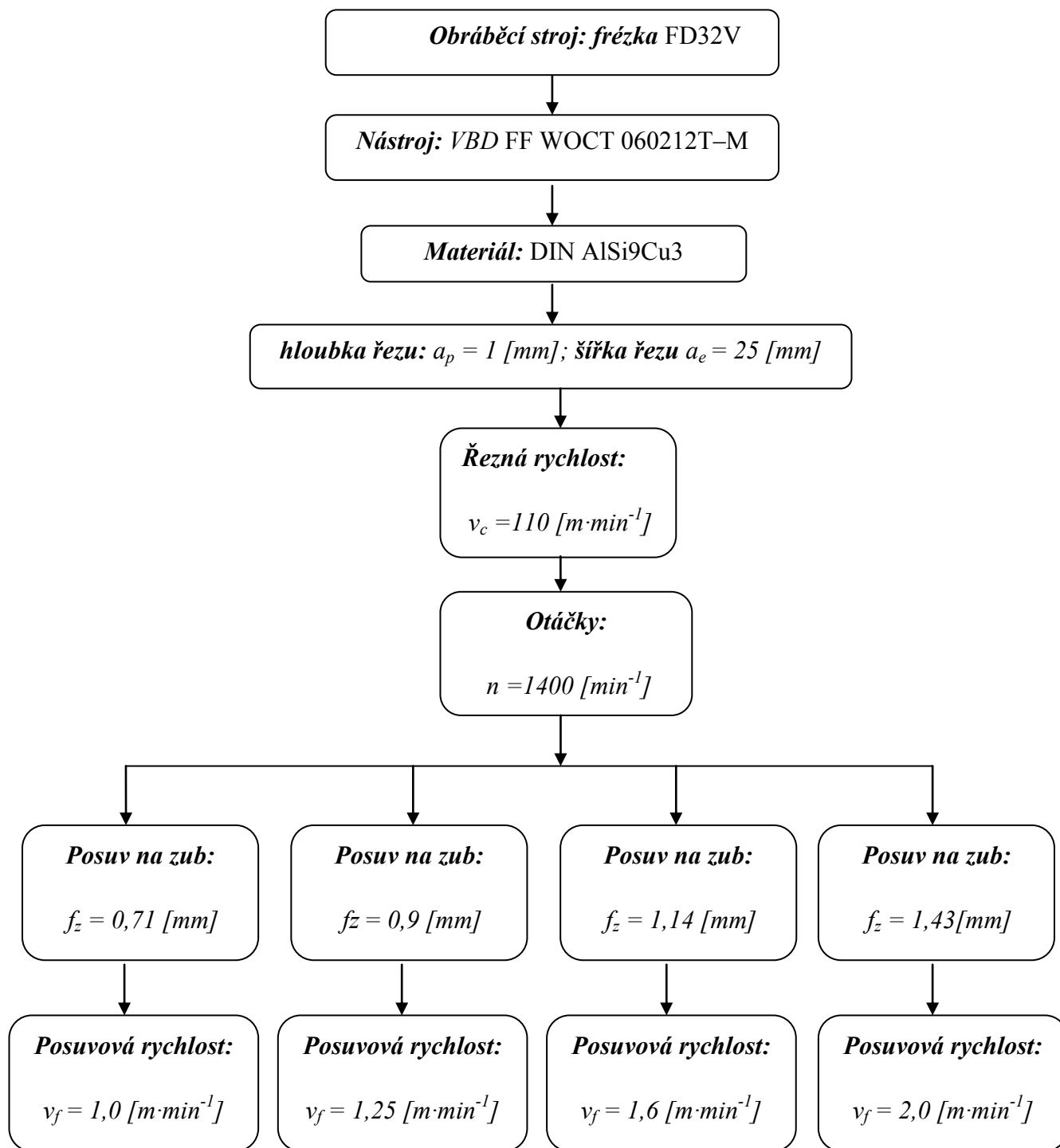
Experiment se zabýval analytickým výpočtem sil a teoretickými drsnostmi povrchu pro čelní frézování s vysokými posuvy pro materiál z hliníkové slitiny DIN AlSi9Cu3. Experiment obsahuje statistické vyhodnocení naměřených dat, ze kterého lze vidět určitý předpoklad změny silového zatížení a drsnosti povrchu při změně rychlosti posuvu.

Tento experiment byl proveden na konvenční frézce FD32V od firmy TOS. Řezným nástrojem byla zvolena speciální fréza pro frézovací operace s vysokými posuvy s označením FF EW D25–M12–06–C s vyměnitelnými břitovými destičkami FF WOCT 060212T – M. VBD, které jsou ze slinutého karbidu s vrstvou povlaku na bázi TiAlN, která byla nanášena metodou povlakování PVD. Pro měření řezných sil byl použit dynamometr KISTLER 9257B připojený k výpočetní technice se softwarem Dynoware a s nastavenou frekvencí 6000 [Hz]. K měření kvality drsnosti povrchu byl zvolen příruční drsnoměr TR100 surface roughness tester od výrobce TIME. Řezné podmínky byly zvoleny s ohledem na parametry frézky FD32V, viz Obr. 6. [8].

Po porovnání vyhodnocených reálných naměřených hodnot s teoretickými vypočtenými hodnotami byly vyvozeny následující závěry:

- teoretické vypočtené hodnoty oproti reálným naměřeným hodnotám se liší o 280%
- se zvyšujícím posuvem na zub  $f_z$  [mm] rostou řezné síly
- se zvyšujícím se posuvem na zub  $f_z$  [mm] klesá měrná řezná síla  $k_c$
- se zvyšujícím se posuvem na zub  $f_z$  [mm] roste drsnost povrchu  $Ra$  [ $\mu\text{m}$ ]
- s rostoucí tloušťkou  $h_m$  třísky klesá měrná řezná síla  $k_c$

Pro více informací, viz literatura [8].



Obr. 6 Schéma navržených řezných podmínek experimentu hliníkové slitiny AlSi9Cu3  
v experimentu: Predikce sil a kvality opracování při frézování s vysokými posuvy [8]

## **1.7 Vlastnosti titanu a jeho slitin**

Titan a jeho slitiny jsou atraktivním materiálem s problematickým zpracováním. Jedná se o materiály s výjimečnými vlastnostmi, zejména vysokou pevností v poměru k měrné hmotnosti, malé hustotě, chemické odolnosti, vysoké teplotní odolnosti, odolnosti proti korozi, odolnosti proti erozi a malé teplotní roztažnosti. Titan a jeho slitiny jsou díky svým vlastnostem využívány v řadě oblastí, jako jsou: medicína, letecký a kosmický průmysl, chemický průmysl, automobilový průmysl, strojírenství. Hlavními legujícími prvky v slitinách titanu jsou: vanad, hliník, niob, molybden, cín, zirkon, chrom. Tyto prvky ovlivňují výslednou strukturu slitin a jejich krystalovou modifikaci [15].

Zpracování titanu a jeho slitin, zejména jejich třískové obrábění patří k velmi náročným procesům. Jsou vyžadovány speciální technologie a řezné nástroje pro jejich zpracování. Slitiny titanu se chovají jako špatně obrobitelné korozivzdorné ocele. Titan patří mezi zpevňující materiály, proto při třískovém obrábění vznikají velmi vysoké řezné síly. Kvůli vysokému řeznému odporu je také vyšší tepelné namáhání nástroje. Při frézování titanových slitin si třísky udržují déle teplo kvůli tomu, že tyto slitiny mají nižší tepelnou vodivost. Tyto negativní vlastnosti mají celkový vliv na namáhání nástroje a jeho životnost [16] [15].

## **1.8 Obrábění titanových slitin**

Titanové slitiny svými mechanicko-metalurgickými vlastnostmi patří mezi těžkoobrobitelné materiály. Tvrdost titanových slitin se pohybuje od 200 do 400 [HB]. Při delší době, kdy je nástroj v záběru s materiálem, nebo i při jeho opakovaném vnikání a výstupu ze záběru, vzniká vysoká teplota a vysoké řezné síly. Díky vlastnostem titanových slitin se tříska utváří velmi těžko a vzniká tendence k vylamování břitu nástroje, což vede k jeho rychlému opotřebení. Při přehřívání nástroje a při špatném odvodu třísek je nutné snížit řezné parametry a tím rychle klesá produktivita obráběcího procesu. Díky relativně malému modulu pružnosti vzniká při třískovém obrábění vlastnost odtlačování obrobku od nástroje, což způsobuje tvorbu vibrací. Proto je nutné obrábět tyto slitiny na tuhém stroji, mít velmi pevné upnutí obrobku, použít vysoce pozitivní a ostrou geometrii řezného nástroje a zvolit optimální řezné parametry [14] [15].

Titanové slitiny mají špatnou vodivost tepla. Při obrábění vzniká poměrně vysoké množství tepla, které špatně odchází z vlastního obrobku a i nástroj je značně tepelně namáhán. Při vysokých teplotách a tlacích v řezné zóně dochází k rychlému opotřebení břitu řezného nástroje. Nástroj je namáhán dynamickými silami, které způsobuje článková tříska a řezná síla v těsné blízkosti břitu. Nejčastější druhy opotřebení jsou ve tvaru vrubu a kráterového výmolu v důsledku chemické degradace řezného materiálu. U obrábění při vysokých teplotách mají titanové slitiny tendenci k chemické reakci s prvky obsaženými v povlaku nástroje a tím může dojít ke tvorbě nárůstku na řezném břitu nástroje. Proto je potřeba sledovat složení povlaků u vyměnitelných břitových destiček [14] [15].

## **1.9 Zásady při frézování titanových slitin**

Pro frézování titanových slitin je doporučených hned několik pravidel, které je nutno dodržet pro optimální řezný proces. Řezné parametry mají různý vliv na životnost nástroje. Největší vliv má řezná rychlost:  $v_c$  a šířka záběru  $a_e$ . Při řezném procesu by šířka záběru měla být minimálně 30 [%] z průměru frézy. Kvůli vysokému rázovému zatížení, které vzniká při opětovném vyjíždění a najíždění do řezného záběru, je doporučeno aplikovat nepřetržitý záběr. Preferuje se sousledné frézování všude, kde je to možné. Volbou vhodného speciálního nástroje lze dosáhnout vyšší produktivity obrábění. Tyto doporučení zvyšují životnost řezných nástrojů a optimalizují celkový řezný proces [16] [17].

Podle složitosti obráběné plochy se volí vhodný obráběcí nástroj. Pro frézovací operace se volí frézy s pozitivním úhlem čela a ostrým, ale pevným břitem. Použití frézy s dlouhými břity a malou zubovou roztečí patří mezi vysokoproduktivní způsob odebrání kovu při frézování slitiny titanu. Nástroj musí dobře odolávat tepelným a chemickým podmínkám vznikajících při obrábění titanových slitin. Fréza musí mít přesné ustavení a stabilní a tuhé upnutí v obráběcím centru. Kombinace těchto vlastností poskytuje odolnost proti opotřebení břitu nástroje. Nízký koeficient tření zajišťuje vysokou odolnost proti tvorbě nárůstků při obrábění titanových slitin. I drobná opotřebení nebo otupění nástroje rychle vedou až k celkovému lomu. Jako ochrana obráběcích nástrojů se volí povlaky založené na metodě PVD, které zachovávají ostřejší hranu, než povlaky založené na metodě CVD. Frézy s malým úhlem nastavení dovolují utvářet malé ztenčené třísky, a proto jsou vhodnou volbou pro vysokoposuvové frézování [16] [14].

## 1.10 Moderní obrábění titanových slitin

Trendem moderní doby je neustálé zvyšování produktivity výroby, aby se dosáhlo snížení výrobních nákladů a časů. Neustálým vývojem řezných nástrojů, povlaků a obráběcích strojů bylo možno vyvinout nové technologie, které zvyšují produktivitu obrábění. Mezi tyto technologie patří vysokoposuvové obrábění, vysokoproduktivní obrábění a vysokorychlostní obrábění [15] [16].

Vysokoposuvové frézování titanových slitin umožňuje v porovnání s konvenčními metodami až třikrát vyšší rychlost obrábění. Specifikace této technologie je malá hloubka řezu  $a_p = 0,4 \div 2,0$  [mm] s vysokými posuvy. Tato kombinace zajišťuje vysoký úběr materiálu a rapidně zvyšuje efektivitu obrábění. Při frézování metodou HFC působí výsledná řezná síla do vřetene stroje, což zvyšuje stabilitu řezného procesu. Neustálým technologickým vývojem jsou kladeny vyšší požadavky na výrobu výkonnějších CNC obráběcích center, které dosahují velmi vysokých hodnot pracovních posuvů a otáček, ale i velmi krátkých vedlejších časů pro výměnu nástroje i rychlou výměnu obrobku. Tyto obráběcí centra musí zajistit svou konstrukcí a svými základními funkcemi uzly prezentované technické a technologické požadavky. Moderní a efektivní metodou u vysokoposuvového frézování drážek a kapes je trochoidní frézování. Při trochoidním frézování je dráha nástroje programována v kruhových drahách s přísuvem vpřed do záběru s každým cyklem. U této metody se používá vždy menší průměr nástroje než je šířka drážky. Dobrého odchodu třísek a snížení tepelného namáhání nástroje se docílí, když v záběru je jen malá část nástroje. Při trochoidním frézování lze použít frézy s větším počtem zubů, jelikož vznikají malé radiální řezné síly a tím lze dosáhnout vyššího posuvu nástroje. Zajištění správného použití trochoidní metody umožňují CAM softwary, které zjednodušují celkové naprogramování tohoto cyklu, zajišťují simulaci a kontrolu dané operace [15] [9].

## 1.11 Rešerše řešené problematiky pro titanové slitiny

K zadanému tématu diplomové práce jsou zpracovány rešerše podobných experimentů. Tyto rešerše obsahují základní popisy projektů a výsledky, kterých se v nich dosáhlo. Díky těmto rešerším lze porovnat výsledky experimentu této diplomové práce s jinými experimenty, které byly zpracovány v těchto publikacích.

### 1.11.1 Rešerše k experimentu: Obrábění titanových a těžkoobrobitelných slitin frézováním

Experiment byl řešen v rámci bakalářské práce na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství, Ústavu strojírenské technologie. Práce se zabývá obráběním titanových a těžkoobrobitelných slitin frézováním s moderními řeznými materiály. V teoretické části práce jsou charakterizovány jednotlivé skupiny těchto slitin a je analyzována jejich obrobitelnost.

Cílem experimentální části je analyzovat obrobitelnost titanové slitiny Ti6Al4V při čelním vysokoposuvovém frézování a vyhodnotit zatížení nástroje a měrné řezné síly  $k_c$ . Jako obráběcí stroj byla použita vertikální frézka FV 25 CNC. Řezným nástrojem byla zvolena fréza PRAMET 63A06R-S90AD11E-C s úhlem nastavení hlavního ostří  $\kappa_r = 90^\circ$  s uložením pro šest vyměnitelných břitových destiček. VBD byly použity celkem tři druhy a to: ADMX 11T316SR-M - 8230, ADEX 11T308FR-FA - HF7 a ADEX 11T316FR-FA - HF7. Řezné podmínky byly navrženy s ohledem na použití různých VBD, viz Tab. 1. [6].

Tab. 1 Řezné podmínky pro slitinu Ti6Al4V [6]

Řezné parametry	Jednotky	Hodnoty
Řezná rychlost: $v_c$	$[m \cdot min^{-1}]$	50
Otáčky: $n$	$[min^{-1}]$	250
Posuv na zub: $f_z$	$[mm]$	0,06
Posuv: $v_f$	$[m \cdot min^{-1}]$	0,015
Hloubka řezu: $a_p$	$[mm]$	0,5

Po vyhodnocení naměřených hodnot byly zjištěny tyto výsledky: [6]

- titanová slitina Ti6Al4V vykazuje zhoršenou obrobitelnost, která je pozorovatelná na časových průbězích zatížení břitu nástroje;
- průměrná hodnota měrné řezné síly dosáhla hodnoty  $k_c = 7452 [N]$ ;
- průměrná hodnota měrné řezné síly po 2 minutách obrábění dosáhla hodnoty přibližně:  $k_c = 8200 [MPa]$

Pro více informací, viz literatura [6].

### 1.11.2 Rešerše k experimentu: Predikce sil a kvality opracování při frézování s vysokými posuvy titanové slitiny Ti6Al4V

Tento experiment byl řešen v rámci diplomové práce na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství, Ústavu strojírenské technologie. V teoretické části diplomové práce je popsána analýza silového zatížení a kvalita opracování povrchu při frézování.

Experiment se zabýval analytickým výpočtem sil a teoretickými drsnostmi povrchu pro čelní frézování s vysokými posuvy pro materiál z titanové slitiny DIN Ti6Al4V. Experiment obsahuje statistické vyhodnocení naměřených dat, ze kterého lze vidět určitý předpoklad změny silového zatížení a drsnosti povrchu při změně rychlosti posuvu.

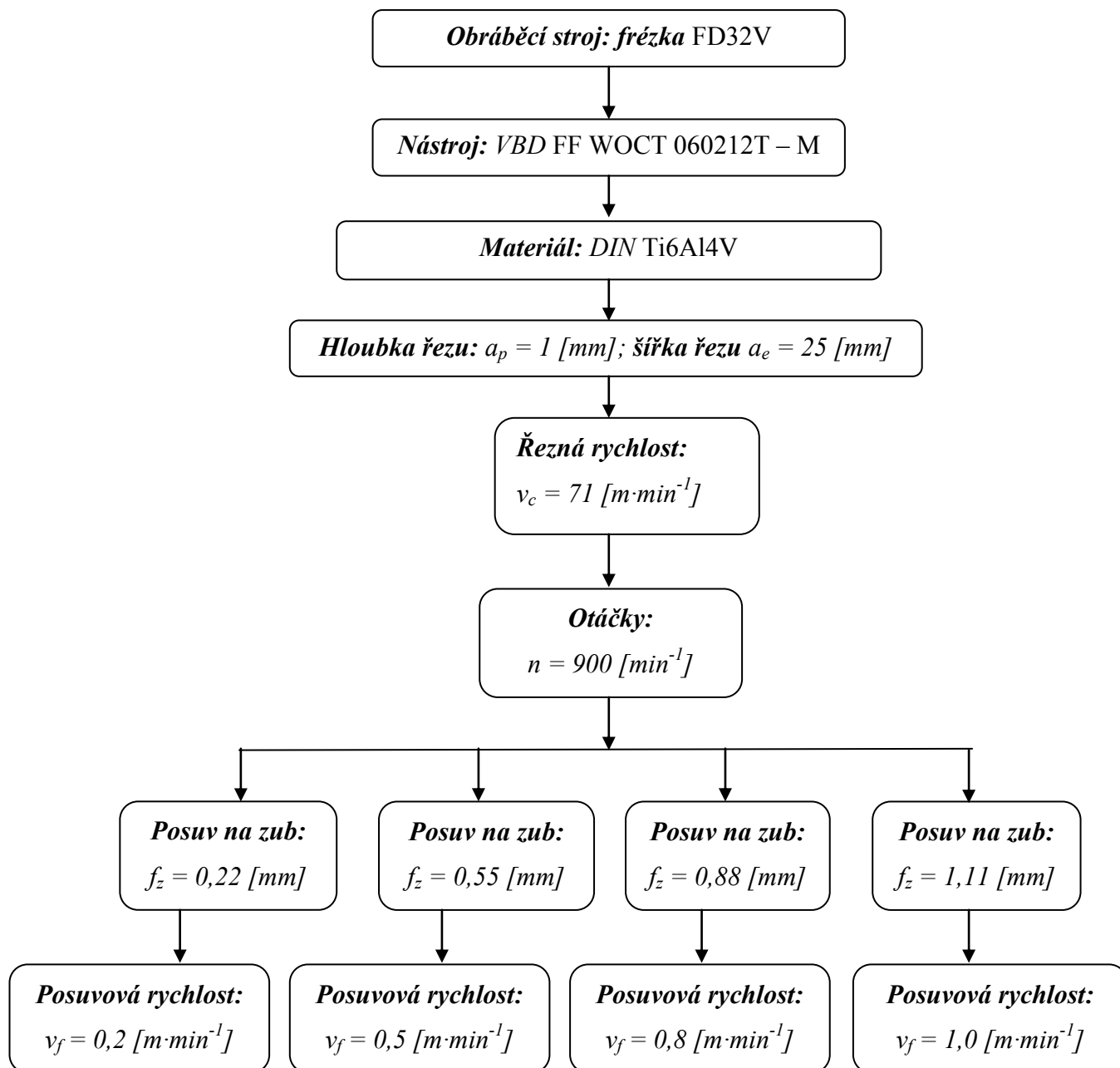
Tento experiment byl proveden na konvenční frézce FD32V od firmy TOS. Řezným nástrojem byla zvolena speciální fréza pro frézovací operace s vysokými posuvy s označením FF EW D25–M12–06–C s vyměnitelnými břitovými destičkami FF WOCT 060212T – M. VBD, které jsou ze slinutého karbidu s vrstvou povlaku na bázi TiAlN, která byla nanесena metodou povlakování PVD. Pro měření řezných sil byl použit dynamometr KISTLER 9257B připojený k výpočetní technice se softwarem Dynoware a s nastavenou frekvencí 6000 [Hz]. K měření kvality drsnosti povrchu byl zvolen příruční drsnoměr TR100 surface roughness tester od výrobce TIME. Řezné podmínky byly zvoleny s ohledem na parametry frézky FD32V [8].

Po porovnání vyhodnocených reálných naměřených hodnot s teoretickými vypočtenými hodnotami byly vyvozeny následující závěry:

- teoretické vypočtené hodnoty oproti reálným naměřeným hodnotám se liší o 194 [%]
- se zvyšujícím se posuvem na zub  $f_z$  [mm] rostou řezné síly;
- se zvyšujícím se posuvem na zub  $f_z$  [mm] klesá měrná řezná síla  $k_c$ ;
- se zvyšujícím se posuvem na zub  $f_z$  [mm] roste drsnost povrchu  $Ra$  [ $\mu\text{m}$ ];
- se zvětšující se hodnotou třísky  $h_m$  klesá měrná řezná síla  $k_c$

Pro více informací, viz literatura [8]





Obr. 7 Schéma navržených řezných podmínek experimentu pro slitinu titanu Ti6Al4V  
v experimentu: Predikce sil a kvality opracování při frézování s vysokými posuvy [8]

## 1.12 Metody frézování

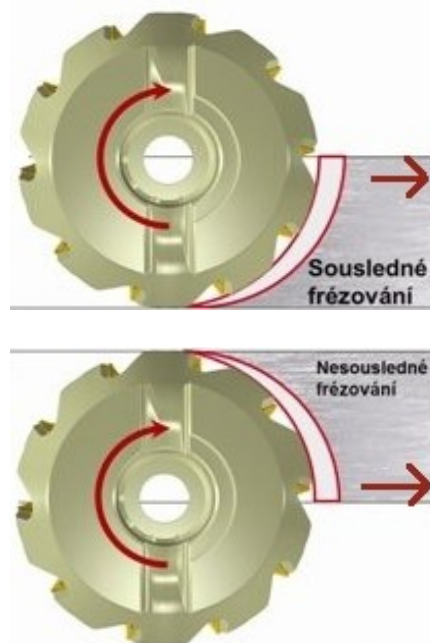
Poloha a směr frézy patří ve strojírenské výrobě mezi důležité faktory při procesu obrábění. Správná volba frézy, dráhy frézy, metody frézování a řezných podmínek jsou nejdůležitějším faktorem pro efektivní a účinné frézování obrobku. Důležité pro efektivní frézování je také správně zvolit typ kontaktu mezi břitem a obráběným materiálem na vstupu a také na výstupu z řezu. Mezi metody frézování patří zejména sousledné a nesousledné frézování, popřípadě jejich kombinace.

### Nesousledné frézování

U nesousledného frézování začíná průřez třísky od nulové tloušťky do její maximální hodnoty. Směr posuvu frézy je při této metodě opačný, než je směr rotace. Břit nástroje je při této metodě přitlačován a dochází k odírání břitu důsledkem velkého tření a vznikají vysoké teploty. Dále zde vznikají velká tahová pnutí, když břit opouští záběr. Při této metodě frézování dochází k většímu opotřebení nástroje, kratší životnosti nástroje, vyšším vibracím, horší kvalitě povrchu než u metody sousledného frézování. Nesousledné frézování je doporučované pro frézky, které mají menší stabilitu, pro frézování velmi tvrdých povrchů, odolných materiálů a při použití keramických břitových destiček pro obrábění žáruvzdorných slitin. Doporučuje se při metodě nesousledného frézování nastavit malou hloubku záběru  $a_p$ , jelikož velká tloušťka třísky a vysoké teploty způsobují ulpívání nebo navařování třísek na břit frézovacího nástroje [42] [41].

### Sousledné frézování

Směr posuvu frézy při sousledném frézování je souhlasný se směrem otáčení frézovacího nástroje. Při této metodě se začíná od největší tloušťky průřezu třísky, až její průřez dosáhne nulové hodnoty. Tento faktor chrání břit před ohlazováním a odíráním o obráběný povrch před vlastním zahájením řezu. Řezné síly mají sklon k přitahování obrobku směrem k frézovacímu nástroji a udržovat stabilně břit v řezu [42] [41].



Obr. 8 Metody sousledného a nesousledného frézování[41]

## 2 Experimentální metodika a experimentální ověření

Experimentální část diplomová práce je zaměřená na problematiku vysokoposuvového čelního frézování titanové slitiny UNS R56260 a to z hlediska kvality povrchu drsnosti a řezných sil při obrábění. Tento experiment byl proveden v Ostravě na Vysoké škole báňské, Fakultě strojní, Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Tato katedra v roce 2015 zakoupila frézovací centrum DMU50, na kterém byl experiment proveden. Nástroj a VBD pro frézování titanových slitin byly použity od firmy Ingresoll Cutting Tools. Experiment se zabývá vyhodnocením naměřených řezných sil a porovnání drsnosti povrchu titanové slitiny při vysokoposuvovém čelním frézování titanové slitiny UNS R56260 v závislosti na navržených řezných podmínkách. Dále budou v diplomové práci porovnány metody sousledného a nesousledného frézování slitiny titanu.

U těchto experimentů byly měněny řezné parametry, a to zejména řezná rychlost  $v_c$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] a posuv na zub  $f_z$  [mm]. Hloubka záběru  $a_p$  [mm] a šířka záběru frézy  $a_e$  [mm] jsou konstantní. Před provedením experimentu bylo nutné vyvrtat do vzorků titanové slitiny díry pro upevnění k dynamometru. Tyto vzorky jsou válcového tvaru a jejich povrch byl před samostatným provedením experimentu frézován, aby nedošlo k hrubým chybám při vyhodnocování naměřených dat. Každý vzorek má své navržené řezné parametry. Při frézování těchto vzorků se měřily a zaznamenávaly řezné síly pomocí dynamometru Kistler 9129AA a to v osách  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ . Tyto hodnoty byly převedeny do číslíkových souřadnic pomocí softwaru DynoWare. Drsnost povrchu byla zkoumána a měřena v laboratoři Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakultě strojní, VŠB - TUO, pomocí drsnoměru Surfes SJ - 210, který vyhodnocuje parametr drsnosti  $R_a$  a  $R_z$ . Naměřené hodnoty byly zpracovány a vyhodnoceny do grafů a tabulek.

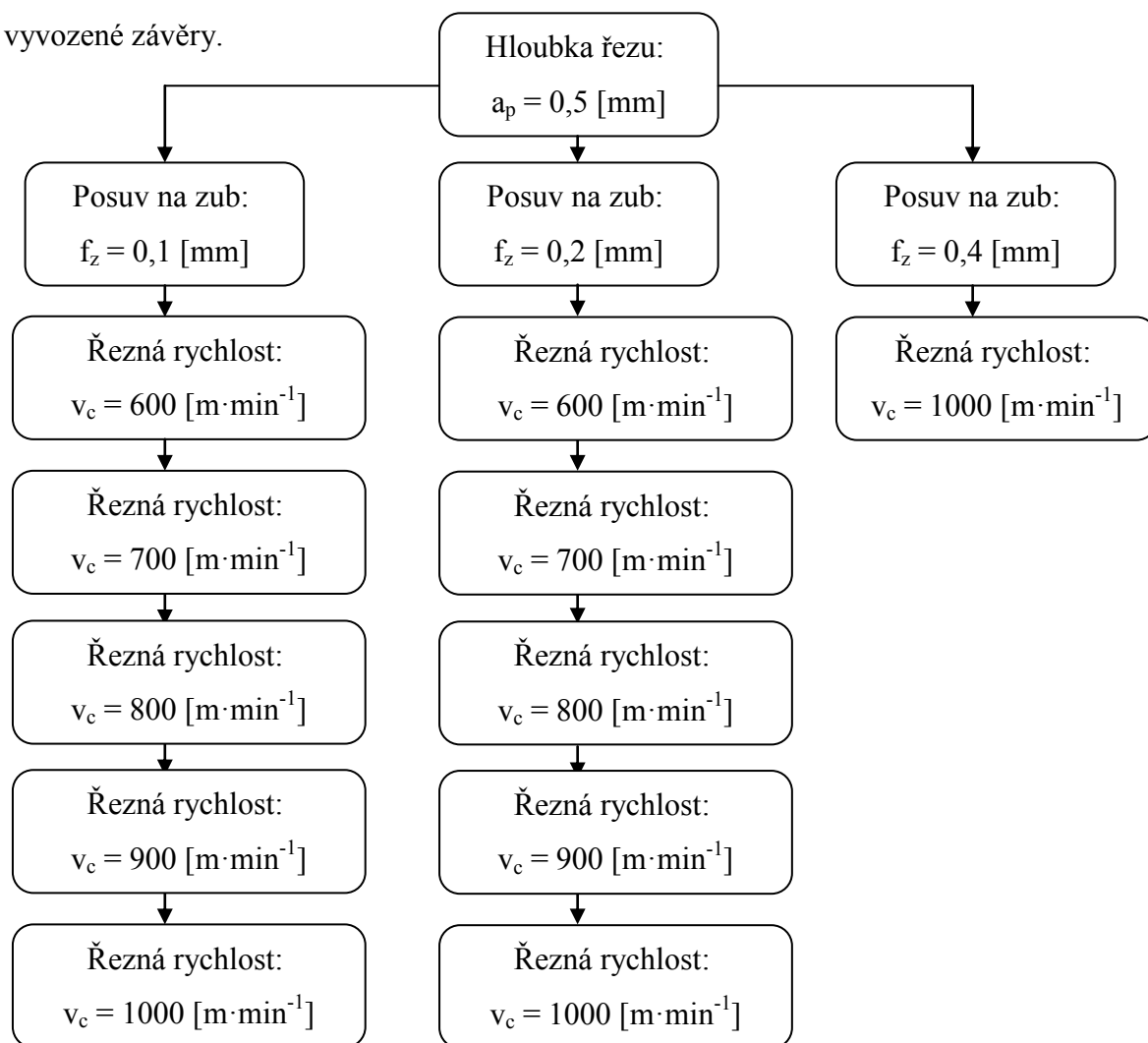
Dle vyhodnocených dat byly vzorky posuzovány z hlediska optimálnějšího řezného procesu. Dále byly porovnány metody sousledného a nesousledného frézování, která z metod vykazuje optimálnější řezný proces.

## 2.1 Rešerše vysokoposuvového frézování hliníkové slitiny

V roce 2015 byla na Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakultě strojní, VŠB - TUO, vypracovaná diplomová práce, která se zabývala problematikou vysokoposuvového frézování hliníkové slitiny. V této diplomové práci byl proveden experiment, který se zabýval vyhodnocením řezných sil a hodnocení drsnosti povrchu při čelním frézování hliníkové slitiny EN AW-6082 [AlSi1MgMn].

V návrhu experimentální části práce je popsáno použité frézovací centrum HURCO VMX 30t, čtyřbřitá fréza HM90 FAL-D050-4-22-15 s frézovací vyměnitelnou destičkou HM90 AXCR 150525R-P od firmy ISCAR. Dále jsou popsány přístroje na měření drsnosti, velikosti řezných sil a navržené řezné podmínky, viz Obr. 9.

V experimentální části diplomové práce jsou vyhodnoceny naměřené hodnoty drsnosti  $R_a$  a  $R_z$  a řezných sil. Tyto výsledky jsou prezentovány v tabulkách a grafech a jsou z nich vyvozené závěry.



Obr. 9 Řezné podmínky pro slitinu EN AW-6082 [7]

Po vyhodnocení naměřených hodnot drsnosti a řezných sil byly vyvozeny tyto závěry:

- Na kvalitu povrchu nemá vliv řezná rychlost, lze využít obrábění s vyšší řeznou rychlostí až  $v_c = 1000 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$  a rychlostí posuvu  $v_f = 5,09 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$ , ale jen při posuvu na zub  $f_z = 0,2 \text{ [mm]}$ , čímž se docílí zkrácení strojních časů.
- Nejvhodnější podmínky pro frézování z pohledu nejmenších řezných sil jsou: posuv na zub  $f_z = 0,1 \text{ [mm]}$  při rychlosti posuvu  $v_f = 1,78 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$  a řezné rychlosti  $v_c = 700 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$ .

Pro více informací, viz literatura [7].

## 2.2 Obráběná titanová slitina UNS R56260

Pro experiment byla zvolena titanová slitina UNS R56260, která dobře odolává vysokým teplotám, má nízkou tepelnou roztažnost, nízkou hustotu, vysokou pevnost, je nemagnetická, má dobré mechanické vlastnosti při vysokých teplotách a má vynikající odolnost proti korozi. Vyznačuje se hlavně výbornou odolností proti korozi v mořské vodě. Používá se v konstrukčních řešeních, kde je potřeba vysoká pevnost, nízká hmotnost a odolnost proti korozi. Vyrábí se z ní díly hlavně pro letecký průmysl na kostry letadel, dále se používá hlavně v ropném a plyném průmyslu. Tato slitina patří mezi titanové pseudo  $\alpha$  slitiny, které obsahují okolo 2 %  $\beta$  stabilizátorů, které zvyšují odolnost proti tepelnému namáhání [22]; [25].

Tab. 2 Chemické složení titanové slitiny UNS R56260 [22]

Obsah prvků	C	O	Mo	Fe	Zr	H	Sn	N	Al
[%]	0,008	0,1	6,01	0,070	3,95	0,0038	2,01	0,008	6,00

Tab. 3 Mechanické vlastnosti titanové slitiny UNS R56260 [22]

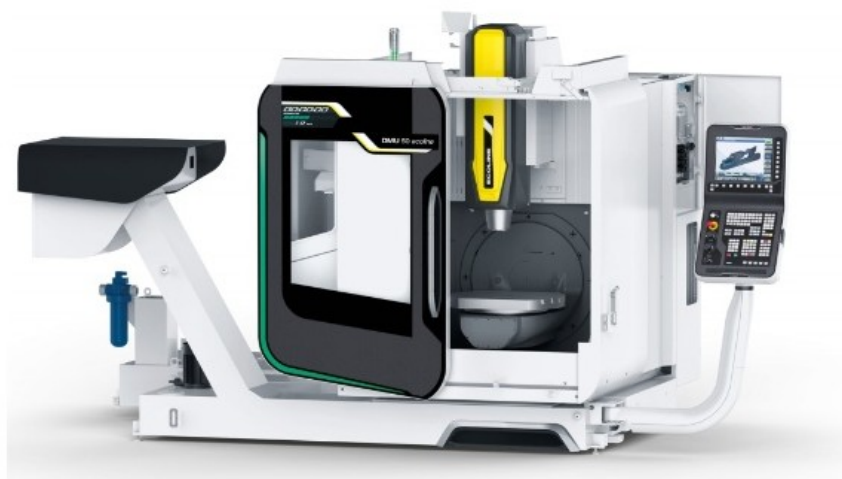
Mechanické vlastnosti	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu: [MPa]	A5 [%]	Hustota [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]	Mez kluzu [MPa]
UNS R56260	113	1269	10	4,65	1172

## 2.3 Obráběcí stroj

Pro zadaný experiment vysokoposuvové frézování titanové slitiny bylo zvoleno pětiosé frézovací centrum DMU 50 od firmy DMGMORI. Tato firma se zabývá dodávkou kvalitních CNC soustruhů, obráběcích center a nejmodernějších pětiosých strojů. Řídicí systém stroje je HeidenhainiTNC 530 HSCI s postprocesorem, který je odladěný pro počítačový software Mastercam.

Tab. 4 Vybrané technické parametry stroje DMU 50 [20]

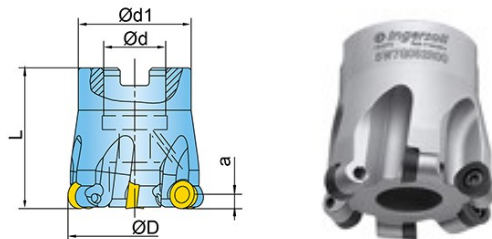
Funkce	Technické parametry
Pojezdy v osách X/ Y/ Z	500/ 450/ 400 [mm]
Otáčky	20 - 18 000 [min <sup>-1</sup> ]
Upínání nástrojů	HSK - A63
Rychloposuv	24 000 [mm·min <sup>-1</sup> ]
Výkon vřetene (40/100%zatížení)	35/25 [kW]
Točivý moment vřetena (40/100%zatížení)	130 / 87 [Nm]
Rozměr otočného stolu	630 x 500 [mm]
Počet nástrojů	16
Maximální zatížení stolu	300 [kg]
Hmotnost stroje	4480 [kg]



Obr. 10 CNC frézovací centrum DMU 50 [20]

## 2.4 Obráběcí nástroj pro slitinu titanu UNS R56260

Při experimentálním vysokoposuvovém čelním frézování titanové slitiny UNS R56260, neboli Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo byla zvolena šestibřitá fréza SW7G052R00 od firmy Ingresoll Cutting Tools.

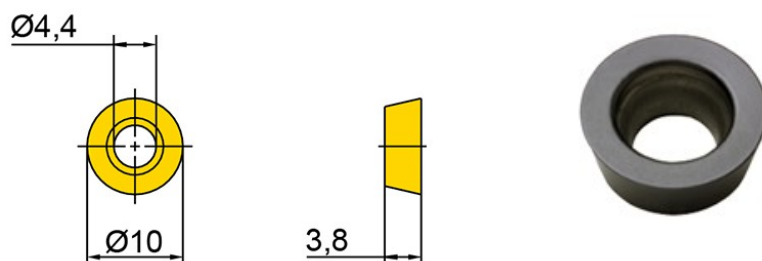


Obr. 11 Fréza SW7G052R00 od firmy Ingresoll Cutting Tools [28]

Tab. 5 Parametry frézy SW7G052R00 od firmy Ingresoll Cutting Tools [28]

$\text{ØD}[\text{mm}]$	$\text{Ød}[\text{mm}]$	$\text{Ød}_1[\text{mm}]$	$L[\text{mm}]$	$a_p [\text{mm}]$	ZU počet zubů [-]
52	22	40,0	50	5	6

### 2.4.1 Vyměnitelné břitové destičky pro slitinu titanu UNS R56260



Obr. 12 VBD RHKW1003M0TN od firmy Ingresoll Cutting Tools [29]

Tab. 6 Vlastnosti VBD RHKW1003M0TN od firmy Ingresoll Cutting Tools [29]

Tloušťka: $t$ [mm]	Průměr: $D_1'$ [mm]	Průměr: $D'$ [mm]	Doporučený posuv na zub $f_z$ [mm]
3,8	4,4	10,0	0,25 - 0,60

## 2.5 Řezné podmínky pro slitinu titanu UNS R56260

Titanová slitina UNS R56260 byla obráběna sousledným i nesousledným frézováním za stejných obráběcích podmínek podle Tab. 7.

Tab. 7 Řezné podmínky při čelním HFM pro slitinu titanu UNS R56260

Obráběný materiál	Řezná rychlost: $v_c [m \cdot min^{-1}]$	Posuv na zub: $f_z [mm]$	Otáčky: $n [min^{-1}]$	Rychlost posuvu: $v_f [m \cdot min^{-1}]$
titanová slitina: UNS R56260	50	0,25	306	0,46
		0,4		0,73
		0,6		1,10
	80	0,25	490	0,73
		0,4		1,18
		0,6		1,76
	100	0,25	612	0,92
		0,4		1,47
		0,6		2,20
	130	0,25	796	1,19
		0,4		1,91
		0,6		2,86



### 2.5.1 Příklad teoretického výpočtu:

Teoretický výpočet rychlosti posuvu pro frézování titanové slitiny UNS R56260 šestibřitou frézou SW7G052R00, která má průměr frézy  $D_1 = 52$  [mm]. VBD byly použity RHKW1003M0TN a dle doporučení výrobce navrhnutý řezné podmínky.

Pro názorný příklad byly vybrány řezné podmínky: posuv na zub  $f_z = 0,25$  [mm] a řezná rychlost  $v_c = 50$  [ $m \cdot \min^{-1}$ ].

Teoretický výpočet rychlosti posuvu  $v_f$  [ $m \cdot \min^{-1}$ ] pro frézování titanové slitiny UNS R56260, frézou o průměru  $D_1 = 52$  [mm] při řezné rychlosti  $v_c = 50$  [ $m \cdot \min^{-1}$ ].

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [mm \cdot \min^{-1}] \quad (1)$$

$$v_f = 0,25 \cdot 6 \cdot 306$$

$$\underline{\underline{v_f = 459 [mm \cdot \min^{-1}] = 0,46 [m \cdot \min^{-1}]}}$$

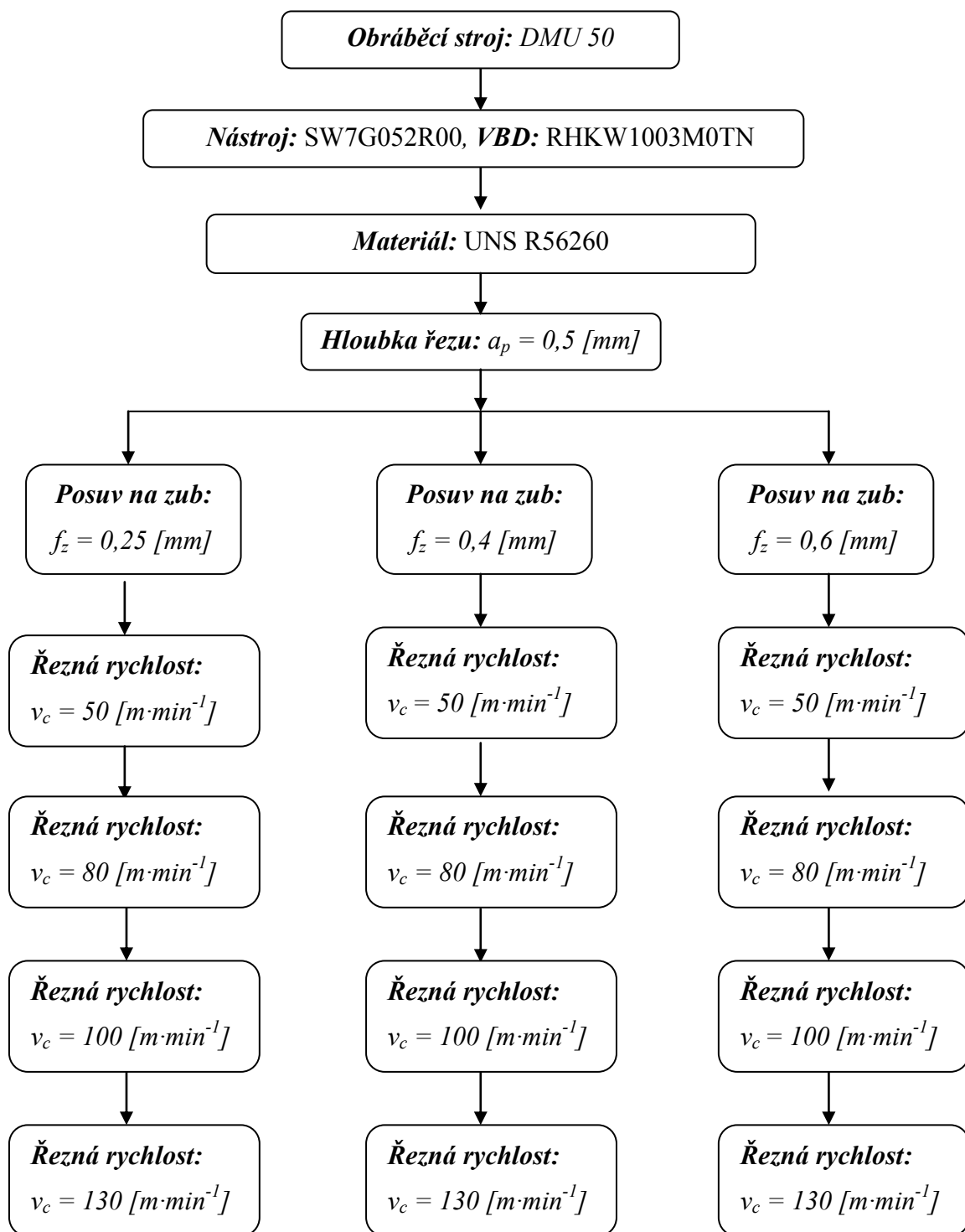
Teoretický výpočet otáček pro frézování titanové slitiny UNS R56260, frézou o průměru  $D_1 = 52$  [mm] při řezné rychlosti  $v_c = 50$  [ $m \cdot \min^{-1}$ ].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{1000} \quad [m \cdot \min^{-1}] \quad (2)$$

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_1}$$

$$n = \frac{50 \cdot 1000}{\pi \cdot 52}$$

$$\underline{\underline{n = 306 [\min^{-1}]}}$$



Obr. 13 Schéma navržených řezných podmínek pro slitinu titanu UNS R52260 při změně posuvu na zub  $f_z$  [mm] a řezné rychlosti  $v_c$  [m·min<sup>-1</sup>] pro sousledné a nesousledné frézování

## 2.6 Použité měřidla pro experiment

Experiment je zaměřen na porovnání vlivu drsnosti a řezných sil při vysokoposuvovém frézování titanové slitiny. Pro naměření parametrů drsnosti byl zvolen drsnoměr Surfesť SJ - 210. Pro naměření a vyhodnocení řezných sil byl využit dynamometr Kistler 9129AA.

### 2.6.1 Drsnoměr SURFTEST SJ-210

Drsnost povrchu frézovaných vzorků se zkoumala pomocí drsnoměru Surfesť SJ - 210. Tento přístroj je od firmy Mitutoyo Corporation, která se zabývá výrobou a dodávkou přístrojů pro metrologii. Drsnoměr SURFTEST SJ - 210 je digitální a přenosný měřicí přístroj k měření a vyhodnocení parametrů drsnosti. Při měření drsnosti povrchu zkoumaných vzorků drsnoměr snímá integritu povrchu pomocí sondy, která vykonává přímočarý vratný pohyb. Zpracovaná data se zobrazují přímo na digitální obrazovce přístroje [21].

Tab. 8 Technické parametry drsnoměru Surfesť SJ - 210 [21]

<i><b>Funkce</b></i>	<i><b>Technické parametry</b></i>
Rychlost měření	0,25; 0,5; 0,75 [mm·s <sup>-1</sup> ]
Návrat měření	1 [mm·s <sup>-1</sup> ]
Rozsah měření	16 [mm]
Přítlačná síla	Méně než 400 [mN]
Měřicí rozsah v ose X (posuv)	17,5 [mm]
Měřicí rozsah v ose Z (zdvih)	360 [μm]; (-200 [μm] až +160 [μm])
Použitelné normy	JIS '82 / JIS '94 / ISO '97 / ANSI / VDA

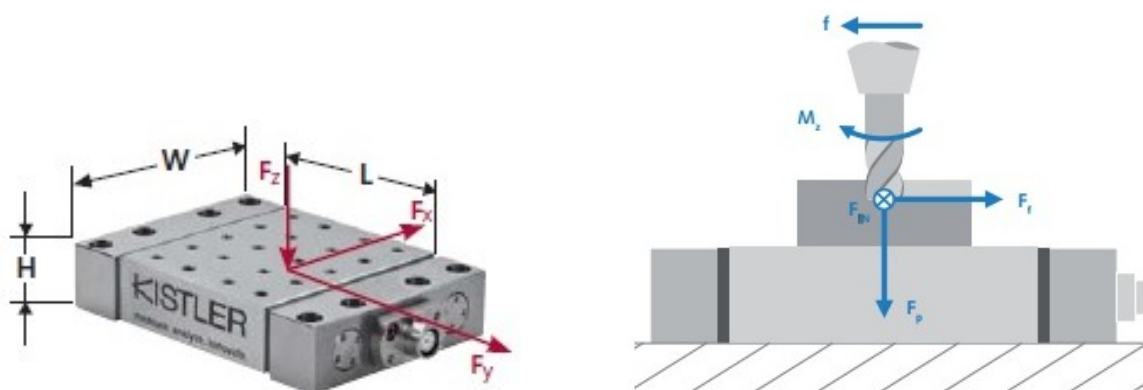


Obr. 14 Drsnoměr Surfesť SJ - 210 [21]

## 2.7 Dynamometr Kistler 9129AA

K měření dynamických sil při čelním vysokoposuvovém frézování titanové slitiny na stroji DMU 50, byl využit stacionární dynamometr Kistler 9129AA. Dynamometr Kistler 9129AA byl pořízen od firmy Kistler Eastern Europe s.r.o. Využívá se k zjišťování silových poměrů při frézování, což slouží k získání informací o mechanickém namáhání soustavy stroj - nástroj - obrobek. Díky vyhodnocení naměřených dat lze upravit řezné podmínky pro optimální proces obrábění. Tento dynamometr měří řezné síly ve směrech řezných složek: [31]

- $F_x = F_{fn}$  - jsou to řezné síly normálové, které jsou kolmé k řezné složce  $F_y$ ;
- $F_y = F_f$  - jsou to řezné síly, které působí ve směru posuvu nástroje;
- $F_z = F_p$  - jsou to řezné síly pasivní;



Obr. 15 Schéma působení složek řezných sil [31]

Tab. 9 Technické parametry dynamometru KISTLER 9129AA [31]

Měření v osách	Rozsah měřících sil [kN]	Teplota při měření [°C]	Rozměry [mm]	Hmotnost [kg]
$F_x, F_y, F_z$	-10 ÷ 10	0 ÷ 70	90 x 105 x 32	3,2

### 3 Zhodnocení dat výsledků experimentu

Experiment je zaměřený na zhodnocení naměřených výsledků řezných sil a parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$ . Při vysokoposuvovém frézování titanové slitiny se měnila řezná rychlost  $v_c$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] a posuv na zub  $f_z$  [mm] a hledala se optimální varianta z navržených řezných podmínek pro nejmenší zatížení řezných nástrojů a stroje, jak pro sousledné, tak i nesousledné frézování.

Řezné síly při experimentu byly měřeny pomocí dynamometru KISTLER 9129AA, který vyhodnocuje naměřená data do složek řezných sil:  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ . Tyto naměřené složky řezných sil byly zpracované do tabulek a grafů. Drsnost povrchu byla vyhodnocena pomocí drsnoměru Surfes SJ - 210. Naměřená data byla zpracovaná do tabulek a grafů. Titanová slitina byla frézovaná sousledně i nesousledně, aby se určilo, která technologie vykazuje lepší výsledky při frézování.

#### 3.1 Vyhodnocení dat drsnosti povrchu

Polotovarem pro experiment byla zvolena titanová slitina UNS R56260 o  $\varnothing 154$  [mm]. Drsnost povrchu se zkoumala pomocí přenosného drsnoměru Surfes SJ-210, který zpracovává naměřená data pomocí softwaru SJ - Tools. Tento drsnoměr zaznamenává hodnoty nerovnosti povrchu pomocí snímače a vyhodnocuje jich do parametrů drsnosti  $Ra$  [ $\mu\text{m}$ ] a  $Rz$  [ $\mu\text{m}$ ] v číslicové formě. Při experimentu byl drsnoměr upnut do stojánku. Podrobnosti o tomto drsnoměru lze dohledat dle literatury [21]. Titanová slitina byla obráběna sousledným i nesousledným způsobem frézování a to vždy po dvanácti vzorcích pro každou metodu. Počet vzorků byl tedy celkem dvacet-čtyři a každý vzorek byl celkem osmkrát frézován. Pro každý vzorek byly navrženy jiné řezné parametry obrábění s ohledem na doporučené řezné parametry od prodejce nástrojů. Pro metody sousledného a nesousledného frézování byly řezné podmínky stejné, aby se tyto metody mohly porovnat. Drsnost byla měřena pro každý vzorek v podélné ose, která je rovna směru posuvu frézování a v příčné ose, která je kolmá k směru posuvu frézování. V každé ose se měřilo celkem desetkrát. Princip měření je znázorněn na Obr. 16.

### 3.1.1 Označení vzorků titanové slitiny UNS R56260

- Pro značení jednotlivých vzorků titanové slitiny byl navrhnut a zvolen následující rozlišovací systém:

***UNS R56260\_6\_50\_0,25\_X6\_S(N)***

*Ti - titanová slitina*

*UNS R56260- specifikace titanové slitiny*

*6 - počet břitů frézy*

*50 - řezná rychlost  $v_c$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]*

*0,25 - posuv na zub  $f_z$  [mm]*

*X – měření drsnosti v podélné ose: x, nebo v ose příčné: y*

*1 – číslo měření*

*S- sousledné frézování*

*N- nesousledné frézování*



Obr. 16 Titanová slitina UNS R52260 a její názorné označení

### 3.1.2 Tabulka zaznamenávání a počítání parametrů drsností $Ra$ a $Rz$

Názorný příklad označení vzorku pro měření parametrů drsnosti  $Ra$  [ $\mu\text{m}$ ] a  $Rz$  [ $\mu\text{m}$ ] při řezné rychlosti  $v_c = 50$  [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ] a posuvu za zub  $f_z = 0,25$  [ $\text{mm}$ ] u sousledného frézování titanové slitiny UNS R56260. Ostatní řezné parametry: rychlost posuvu  $v_f$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ] a otáčky  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] byly vypočteny v předchozím vztahu (1; 2).

Tab. 10 Tabulka naměřených hodnot parametrů drsnosti povrchu

Číslo měření: $n$	Označení měření: $x_i$	Měřené parametry drsnosti povrchu	
		$Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Rz$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	UNS R56260_6_50_0,25_X1_S	0,516	3,323
2	UNS R56260_6_50_0,25_X2_S	0,754	3,993
3	UNS R56260_6_50_0,25_X3_S	0,549	3,076
4	UNS R56260_6_50_0,25_X4_S	0,799	3,892
5	UNS R56260_6_50_0,25_X5_S	0,580	3,519
6	UNS R56260_6_50_0,25_X6_S	0,597	3,821
7	UNS R56260_6_50_0,25_X7_S	0,633	3,745
8	UNS R56260_6_50_0,25_X8_S	0,691	3,201
9	UNS R56260_6_50_0,25_X9_S	0,647	3,385
10	UNS R56260_6_50_0,25_X10_S	0,609	3,148
Součet naměřených hodnot		6,38	35,10
Aritmetický průměr hodnot		0,64	3,51

### 3.1.3 Testování hodnot podezřelých na zatížení hrubou chybou

Po naměření hodnot parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  je zapotřebí provést kontrolu na chyby hrubé. Chyby hrubé vznikají při nesprávném provedení měření, nesprávném odečtením hodnot, nesprávném způsobu zpracování, vadě přístroje a podobně. Tyto hrubé chyby musí být odstraněny ze souboru naměřených hodnot. Měření a výpočty se prováděly podle literatury [39].

### Postup pro zjišťování hrubé chyby:

- I. ze souboru naměřených hodnot  $x_1 < x_2 \dots < x_n$  se vypočítá jejich hodnota  $\bar{x}$  – průměrná hodnota výběru,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \text{ kde } (3)$$

$x_i$  naměřené hodnoty veličiny;

$n$  rozsah výběru.

**Příklad výpočtu průměrné hodnoty výběru  $\bar{x}$ :** (použité hodnoty  $x_i$  z Tab. 10)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{6,38}{10} = 0,64 [\mu\text{m}]$$

### Výběrová směrodatná odchylka $s(x)$ :

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; \text{ kde } (4)$$

$x_i$  - naměřené hodnoty veličiny

$\bar{x}$  - průměrná hodnota výběru

$n$  - rozsah výběru

### Příklad výpočtu výběrové směrodatné odchylky:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,0710}{10-1}} = 0,0888 [\mu\text{m}]$$



- II. Posouzení odlehlosti podezřelých hodnot souboru  $(x_2, x_n)$  se vypočítají normované hodnoty  $H_2, H_n$ .

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} \quad (5) \quad \text{nebo:} \quad H_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)}, \text{ kde} \quad (6)$$

$x_i$  naměřené hodnoty veličiny

$\bar{x}$  průměrná hodnota výběru

$s(x)$  výběrová směrodatná odchylka

$n$  rozsah výběru

- III. Mezní hodnota  $H$  se určí z tabulek pro předem stanovenou pravděpodobnost  $p$  a počet měření v souboru  $n$ . Z tabulek se určilo, že při pravděpodobnosti  $p = 95 \text{ [\%]}$  a při počtu měření  $n = 10$  je mezní hodnota  $H = 2,18$  [39].

- IV. Když hodnota  $H_2 < 2,18$ , tak potom hodnota  $x_2$  není zatížená hrubou chybou a ponechává se v souboru pro další vyhodnocení měření. Když  $H_n < H$ , tak je hodnota  $x_n$  ovlivněna hrubou chybou a ze souboru naměřených hodnot se odstraní [39].

**Příklad výpočtu normované hodnoty  $H_2$ :**

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} = \frac{0,64 - 0,754}{0,0888} = -1,3118$$

Když hodnota  $H_2 < 2,18$ , tak hodnota  $x_2$  není zatížená hrubou chybou a zůstává v souboru pro další vyhodnocení měření.

### 3.1.4 Stanovení nejistoty měření

Nejistota měření se označuje parametr, který souvisí s výsledkem měření a zahrnuje rozsah hodnot, které lze přiřadit k naměřené veličině. Pro každý obrobený povrch vzorku je stanovena nejistota měření drsnosti a to standardní nejistota typu A ( $u_A$ ), standardní nejistota typu B ( $u_B$ ) a kombinovaná nejistota ( $u_C$ ) [39].

#### Standardní nejistota typu A ( $u_A$ )

Stanovuje se pomocí výpočtu směrodatné odchylky  $s(\bar{x})$ , která je dána vztahem (4). Je získaná z opakovaných měření. Čím více měření, tím její hodnota klesá. Doplnuje se o standardní nejistotu typu B ( $u_B$ ) [39].

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}; \text{ kde} \quad (7)$$

$s(\bar{x})$	směrodatná odchylka;
$x_i$	naměřené hodnoty veličiny;
$\bar{x}$	průměrná hodnota výběru;
$n$	rozsah výběru.

#### Příklad výpočtu nejistoty měření – standardní nejistota typu A ( $u_A$ )

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} = \sqrt{\frac{0,0710}{10 \cdot (10 - 1)}} = 0,0281 [\mu\text{m}]$$

#### Standardní nejistota typu B ( $u_B$ )

Jedná se o metodu určování standardní nejistoty, která je zaměřená na výběrový průměr, ale určuje se jiným způsobem než metodou přes směrodatnou odchylku. Je nezávislá na počtu měření drsnosti [39].

### Standardní nejistoty typu B ( $u_B$ ):

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2}, \text{ kde} \quad (8)$$

$u_{B1}$  nejistota vlivu opěrné paty snímacího hrotu;

$u_{B2}$  nejistota měřicího přístroje,  $u_{B2} = 0,03$ .

$$u_{B1} = \frac{z_{1 \max}}{k}, \text{ kde} \quad (9)$$

$z_{1 \max}$  hodnota byla stanovena na úrovni  $z_{1 \max} = \pm 3\%$  z naměřené hodnoty pro daný měřicí přístroj;

$k$  součinitel vycházející ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistoty řídí,  $k = \sqrt{3}$

### Příklad výpočtu nejistoty měření

- Standardní nejistoty typu B ( $u_B$ )
- Nejistota vlivu opěrné paty snímacího hrotu  $u_{B1}$
- Nejistota měřicího přístroje  $u_{B2}$

$$u_{B1} = \frac{\bar{x} \cdot 0,03}{k}$$

$$u_{B2} = \bar{x} \cdot 0,03$$

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2}$$

$$u_{B1} = \frac{1,853 \cdot 0,03}{\sqrt{3}}$$

$$u_{B2} = 1,853 \cdot 0,03$$

$$u_B = \sqrt{0,032^2 + 0,055^2}$$

$$u_{B1} = 0,0110 \text{ } [\mu m]$$

$$u_{B2} = 0,0191 \text{ } [\mu m]$$

$$\underline{\underline{u_B = 0,0221 \text{ } [\mu m]}}$$

**Kombinovaná standardní nejistota ( $u_c$ ):**

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (10)$$

**Příklad výpočtu nejistoty měření - kombinovaná standardní nejistota ( $u_c$ )**

$$u_c = \sqrt{0,0281^2 + 0,0221^2}$$

$$u_c = 0,0357 [\mu\text{m}]$$

**Rozšířená kombinovaná nejistota ( $U_c$ ):**

$$U_c = k_U \cdot u_c, \text{ kde} \quad (11)$$

$u_c$  kombinovaná standardní nejistota;

$k_u$  koeficient rozšíření (pokrytí), byl stanoven  $k_u = 2$ .

Pro rozdělení se koeficient rozšíření  $k = 2$ , odpovídá úrovni spolehlivosti přibližně 95 [%].

**Příklad výpočtu nejistoty měření - rozšířená kombinovaná nejistota  $U_c$**

$$U_c = k_U \cdot u_c$$

$$U_c = 2 \cdot 0,0357$$

$$U_c = 0,07 [\mu\text{m}]$$

### 3.1.5 Řezné parametry a průměrné hodnoty výběru měřených parametrů drsnosti $Ra$ a $Rz$ při sousledném frézování

Tab. 11 Vypočítané průměrné hodnoty výběru měřených drsností  $Ra$  a  $Rz$  v závislosti na řezných podmínkách pro slitinu titanu UNS R56260 při sousledném frézování.

Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Otáčky: $n$ [min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Průměrná hodnota výběru měřených drsností povrchu:			
				Podélná osa: x		Příčná osa: y	
				$Ra$ [μm]	$Rz$ [μm]	$Ra$ [μm]	$Rz$ [μm]
50	0,25	306	0,459	0,64	3,51	0,46	2,84
	0,4		0,735	1,06	5,81	0,81	4,70
	0,6		1,102	1,23	6,06	0,99	5,08
80	0,25	490	0,735	0,86	5,10	0,78	4,58
	0,4		1,175	1,07	5,73	0,94	5,32
	0,6		1,763	1,21	6,28	0,95	5,45
100	0,25	612	0,918	1,99	5,62	0,75	4,16
	0,4		1,469	1,11	5,86	0,76	4,35
	0,6		2,204	1,13	5,92	0,93	4,80
130	0,25	796	1,194	0,95	5,12	0,84	4,66
	0,4		1,910	1,12	5,71	0,88	4,68
	0,6		2,865	1,35	7,31	0,92	5,07

UNS R56260\_6\_100\_0,25\_S



UNS R56260\_6\_100\_0,6\_S

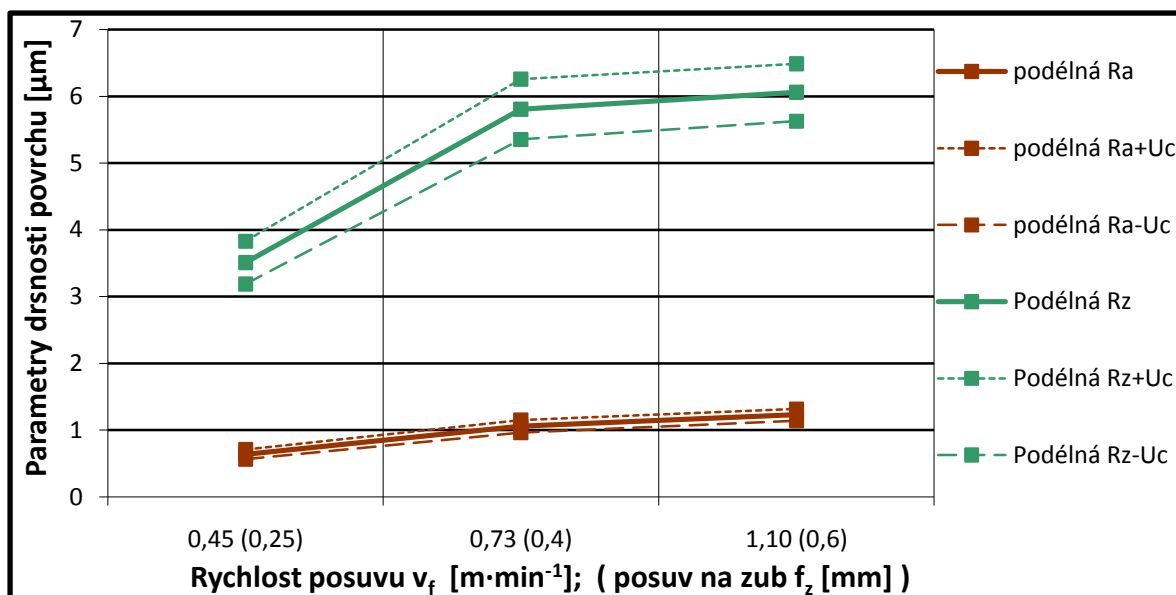


Obr. 17 Detail obrobených vzorků titanové slitiny UNS R56260 pro řeznou rychlost  $v_c = 100$  [m·min<sup>-1</sup>], posuv na zub  $f_z = 0,25$  [mm] a řeznou rychlost  $v_c = 100$  [m·min<sup>-1</sup>], posuv na zub  $f_z = 0,6$  [mm] při sousledném frézování

### 3.1.6 Nejmenší naměřená drsnost při sousledném frézování a její rozšířená kombinovaná nejistota měření $U_C$ .

Tab. 12 Vypočítané průměrné hodnoty výběru parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  při sousledném frézování a jejich rozšířená kombinovaná nejistota měření  $U_C$ , naměřených v ose: x při daných řezných podmínkách.

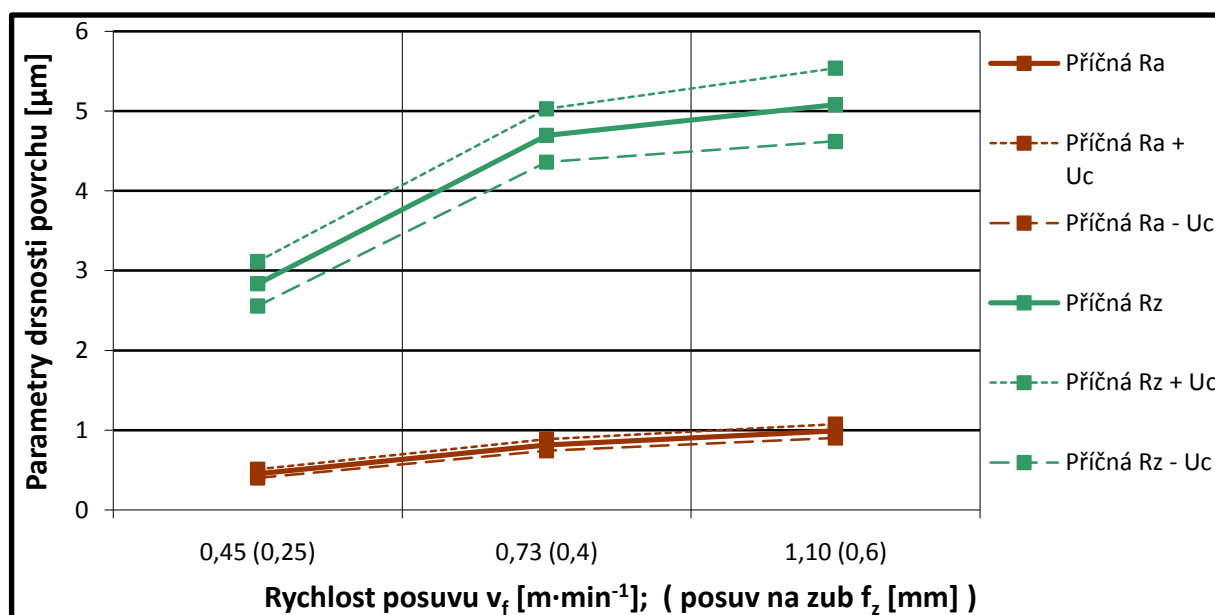
Označení materiálu:	Rychlost posuvu: $v_f$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Otáčky: $n$ [ $min^{-1}$ ]	Průměrná hodnota výběru a rozšířená kombinovaná nejistota měření $U_C$ měřených drsností povrchu:					
			Podélná osa x:					
			$Ra$ [ $\mu m$ ]	$Ra + U_C$ [ $\mu m$ ]	$Ra - U_C$ [ $\mu m$ ]	$Rz$ [ $\mu m$ ]	$Rz + U_C$ [ $\mu m$ ]	$Rz - U_C$ [ $\mu m$ ]
UNS R56260_6_50_0,25_S	0,46	306	0,64	0,71	0,57	3,51	3,83	3,19
UNS R56260_6_50_0,4_S	0,73		1,06	1,15	0,97	5,81	6,25	5,36
UNS R56260_6_50_0,6_S	1,10		1,23	1,32	1,14	6,06	6,48	5,63



Graf 1. Parametry drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  při sousledném frézování a jejich rozšířená kombinovaná nejistota měření  $U_C$ , při konstantní řezné rychlosti  $v_c$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] v závislosti na změně rychlosti posuvu  $v_f$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] a posuvu na zub  $f_z$  [mm] ve směru měření osy x

Tab. 13 Vypočítané průměrné hodnoty výběru parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  při sousledném frézování a jejich rozšířená kombinovaná nejistota měření  $U_C$ , naměřených v ose: y při daných řezných podmínkách.

Označení materiálu:	Rychlost posuvu: $v_f$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Otáčky: $n$ [ $min^{-1}$ ]	Průměrná hodnota výběru a rozšířená kombinovaná nejistota měření $U_C$ měřených drsností povrchu:					
			Příčná osa y:					
			$Ra$ [ $\mu m$ ]	$Ra + U_C$ [ $\mu m$ ]	$Ra - U_C$ [ $\mu m$ ]	$Rz$ [ $\mu m$ ]	$Rz + U_C$ [ $\mu m$ ]	$Rz - U_C$ [ $\mu m$ ]
UNS R56260_6_50_0,25_S	0,46	306	0,46	0,51	0,40	2,84	3,11	2,56
UNS R56260_6_50_0,4_S	0,73		0,81	0,89	0,74	4,70	5,03	4,36
UNS R56260_6_50_0,6_S	1,10		0,99	1,08	0,90	5,08	5,54	4,62



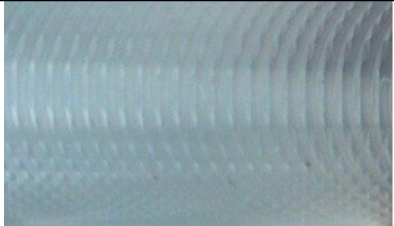
Graf 2. Parametry drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  při sousledném frézování a jejich rozšířená kombinovaná nejistota měření  $U_C$ , při konstantní řezné rychlosti  $v_c$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] v závislosti na změně rychlosti posuvu  $v_f$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] a posuvu na zub  $f_z$  [mm] ve směru měření osy y

### 3.1.7 Řezné parametry a průměrné hodnoty výběru měřených parametrů drsnosti $Ra$ a $Rz$ při nesousledném frézování


Tab. 14 Vypočítané průměrné hodnoty výběru měřených drsností v závislosti na řezných podmínkách pro slitinu titanu UNS R56260 při nesousledném frézování.

Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Otáčky: $n$ [min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Průměrná hodnota výběru měřených drsností povrchu:			
				Podélná osa: x		Příčná osa: y	
				$Ra$ [μm]	$Rz$ [μm]	$Ra$ [μm]	$Rz$ [μm]
50	0,25	306	0,459	0,98	5,29	0,79	4,57
	0,4		0,735	1,12	5,82	0,95	5,15
	0,6		1,102	1,26	7,05	1,01	5,17
80	0,25	490	0,735	0,87	5,15	0,79	4,88
	0,4		1,175	1,16	6,20	0,96	5,38
	0,6		1,763	1,37	6,84	1,04	5,56
100	0,25	612	0,918	1,10	5,65	0,78	4,59
	0,4		1,469	1,16	5,90	0,88	4,60
	0,6		2,204	1,26	6,18	0,96	4,87
130	0,25	796	1,194	1,27	6,08	0,91	4,85
	0,4		1,910	1,25	6,09	0,94	4,91
	0,6		2,865	1,58	7,44	1,03	5,31

UNS R56260\_6\_100\_0,25\_N



UNS R56260\_6\_100\_0,6\_N



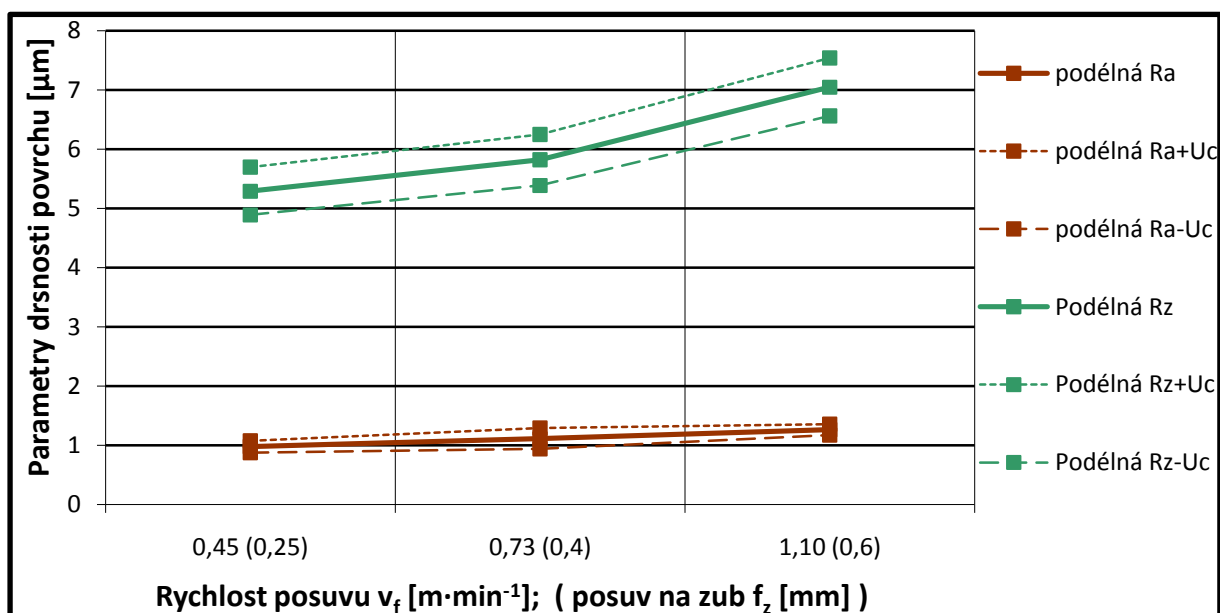
Obr. 18 Detail obrobených vzorků titanové slitiny UNS R52260 pro  $v_c = 100$  [m·min<sup>-1</sup>],  $f_z = 0,25$  [mm] a  $v_c = 100$  [m·min<sup>-1</sup>],  $f_z = 0,6$  [mm] při nesousledném frézování



### 3.1.8 Nejmenší naměřená drsnost při nesousledném frézování a její rozšířená kombinovaná nejistota měření $U_C$ .

Tab. 15 Vypočítané průměrné hodnoty výběru parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  při nesousledném frézování a její rozšířená kombinovaná nejistota měření  $U_C$ , naměřených v ose: x při daných řezných podmínkách.

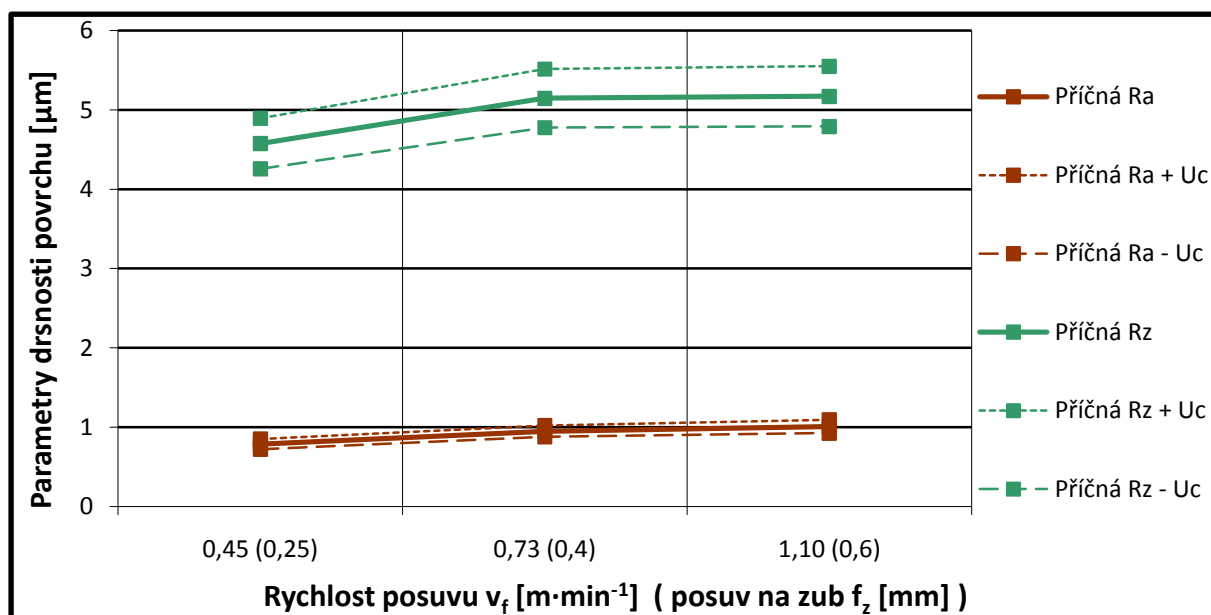
Označení materiálu:	Rychlost posuvu: $v_f$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Otáčky: $n$ [ $min^{-1}$ ]	Průměrná hodnota výběru a rozšířená kombinovaná nejistota měření $U_C$ měřených drsností povrchu:					
			Podélná osa x:					
			$Ra$ [ $\mu m$ ]	$Ra + U_C$ [ $\mu m$ ]	$Ra - U_C$ [ $\mu m$ ]	$Rz$ [ $\mu m$ ]	$Rz + U_C$ [ $\mu m$ ]	$Rz - U_C$ [ $\mu m$ ]
UNS R56260_6_50_0,25_N	0,46	306	0,98	1,07	0,88	5,29	5,69	4,89
UNS R56260_6_50_0,4_N	0,73		1,12	1,29	0,94	5,82	6,25	5,39
UNS R56260_6_50_0,6_N	1,10		1,26	1,36	1,17	7,05	7,54	6,56



Graf 3. Parametry drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  při nesousledném frézování a jejich rozšířená kombinovaná nejistota měření  $U_C$ , při konstantní řezné rychlosti  $v_c$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] v závislosti na změně rychlosti posuvu  $v_f$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] a posuvu na zub  $f_z$  [mm] ve směru měření osy x

Tab.16 Vypočítané průměrné hodnoty výběru parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  při nesousledném frézování a jejich rozšířená kombinovaná nejistota měření  $U_c$ , naměřených v ose: y, za daných řezných podmínek při nesousledném frézování.

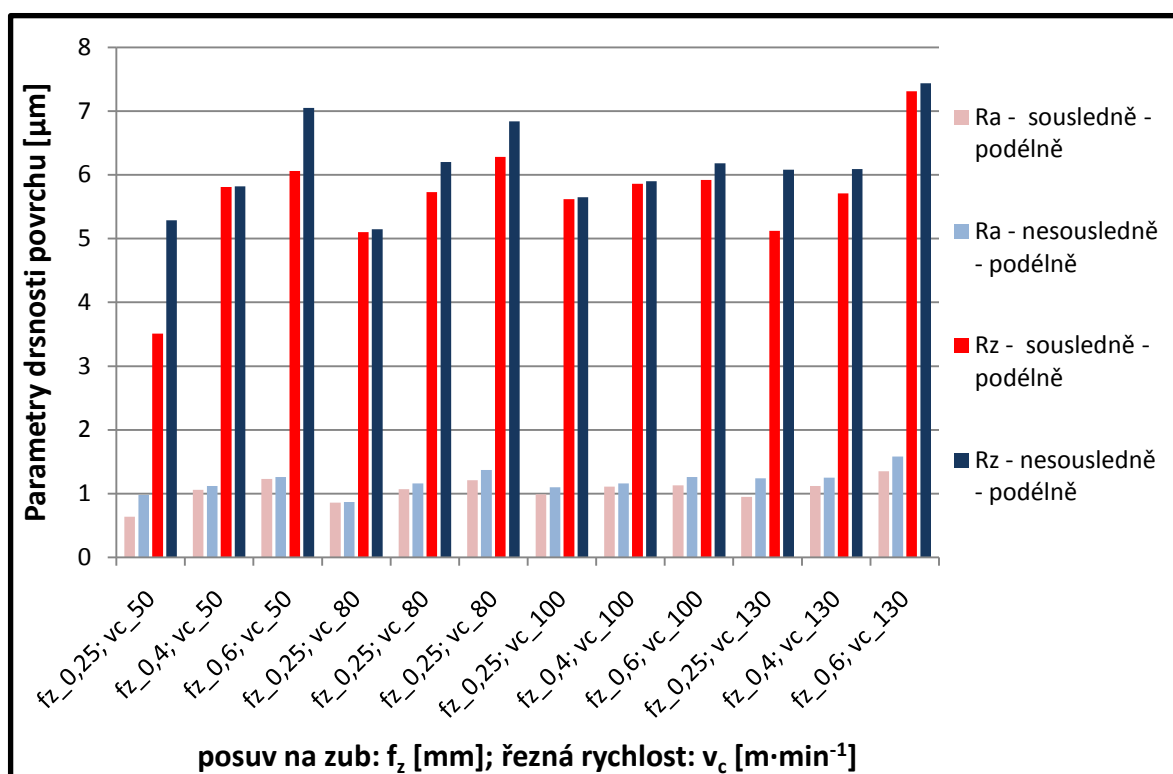
Označení materiálu:	Rychlost posuvu: $v_f$ [ $m \cdot min^{-1}$ ]	Otáčky: $n$ [ $min^{-1}$ ]	Průměrná hodnota výběru a rozšířená kombinovaná nejistota měření $U_c$ měřených drsností povrchu:					
			Příčná osa y:					
			$Ra$ [ $\mu m$ ]	$Ra + U_c$ [ $\mu m$ ]	$Ra - U_c$ [ $\mu m$ ]	$Rz$ [ $\mu m$ ]	$Rz + U_c$ [ $\mu m$ ]	$Rz - U_c$ [ $\mu m$ ]
UNS R56260_6_50_0,25_N	0,46	306	0,79	0,85	0,72	4,57	4,89	4,26
UNS R56260_6_50_0,4_N	0,73		0,95	1,02	0,88	5,15	5,52	4,78
UNS R56260_6_50_0,6_N	1,10		1,01	1,09	0,93	5,17	5,55	4,79



Graf 4. Parametry drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  při nesousledném frézování a jejich rozšířená kombinovaná nejistota měření  $U_c$ , při konstantní řezné rychlosti  $v_c$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] v závislosti na změně rychlosti posuvu  $v_f$  [ $m \cdot min^{-1}$ ] a posuvu na zub  $f_z$  [mm] ve směru měření osy y

### 3.1.9 Porovnání parametrů drsnosti $R_a$ a $R_z$ v podélném směru měření při sousledném a nesousledném frézování titanové slitiny

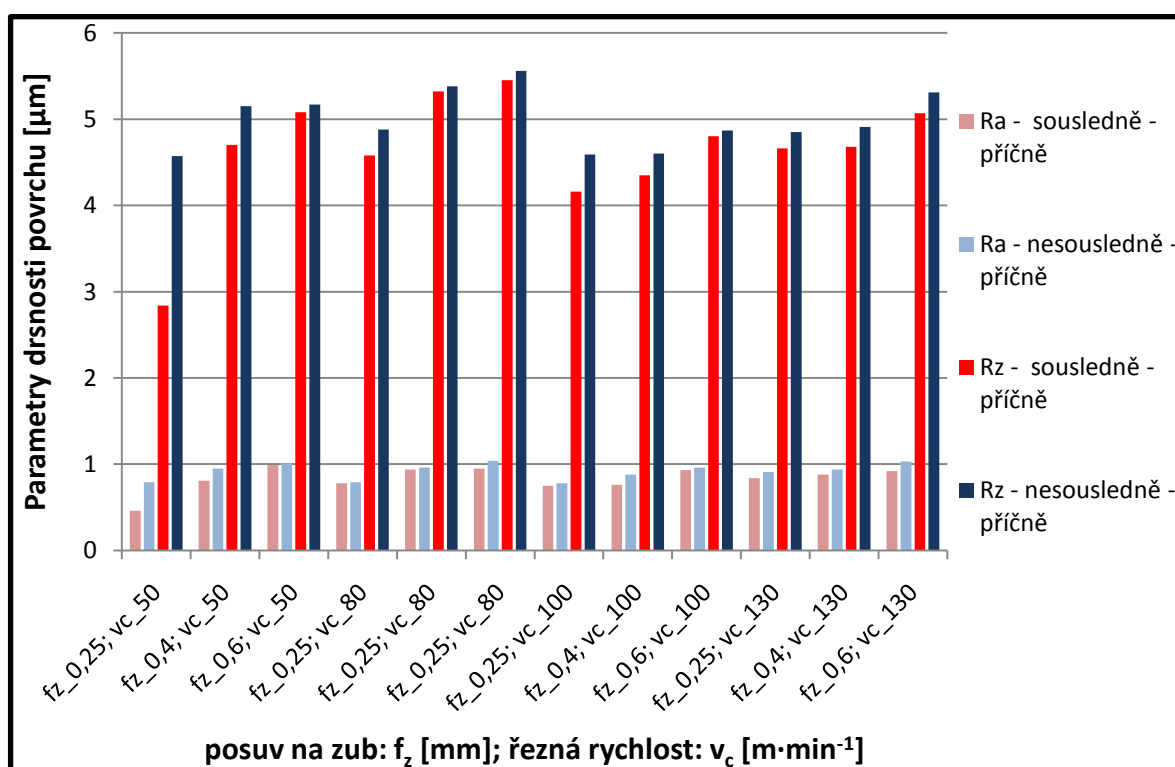
Pro srovnání sousledného a nesousledného frézování byla vybrána průměrná hodnota výběru měřených drsností povrchu  $R_a$  a  $R_z$ . Z grafu 5. vyplívá, že při zvyšování posuvu na zub  $f_z$  [mm] dochází ke zvyšování hodnot drsnosti  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] i  $R_z$  [ $\mu\text{m}$ ], a to jak u sousledného, tak i nesousledného frézování. Dále je patrné, že při nesousledném frézování parametry drsnosti  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] a  $R_z$  [ $\mu\text{m}$ ] dosahují vyšších hodnot než při sousledném frézování.



Graf 5. Porovnání parametrů drsnosti  $R_a$  a  $R_z$  pro titanovou slitinu UNS R56260 ve směru posuvu frézování u sousledného a nesousledného frézování.

### 3.1.10 Porovnání parametrů drsnosti $Ra$ a $Rz$ v příčném směru měření při sousledném a nesousledném frézování titanové slitiny

Pro srovnání sousledného a nesousledného frézování byla vybrána střední hodnota výběru měřených drsností povrchu  $Ra$  a  $Rz$ . Z grafu 6. vyplívá, že při zvyšování posuvu na zub  $f_z$  [mm] dochází ke zvyšování hodnot drsnosti  $Ra$  [ $\mu\text{m}$ ] i  $Rz$  [ $\mu\text{m}$ ], a to jak u sousledného, tak i nesousledného frézování. Dále je patrné, že při nesousledném frézování parametry drsnosti  $Ra$  [ $\mu\text{m}$ ] a  $Rz$  [ $\mu\text{m}$ ] dosahují vyšších hodnot než při sousledném frézování.



Graf 6. Porovnání parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  pro titanovou slitinu UNS R56260 ve směru kolmém na posuv frézování u sousledného a nesousledného frézování

### 3.1.11 Dosažené výsledky hodnocení povrchu slitiny titanu UNS R56260

Dle zadání experimentu byla vyhodnocena drsnost pro slitinu titanu UNS R56260 při sousledném i nesousledném frézování. Tyto dvě metody byly porovnány a vyhodnoceny do tabulek a grafů. Tato titanová slitina byla obráběna vysokoposuvovým čelním frézováním šestibřitou frézou. Měřené složky drsnosti byly  $Ra$  a  $Rz$ , které byly vždy desetkrát měřeny v ose  $x$ , která je rovna směru posuvu frézování a v ose  $y$ , která je kolmá na směr posuvu frézování.

Nejmenší parametry drsnosti povrchu  $Ra$  a  $Rz$  při sousledném frézování pro měření v ose:  $x$ , vykazuje vzorek UNS R56260\_6\_50\_0,25\_S. To znamená, že nejmenší drsnosti povrchu  $Ra$  a  $Rz$  při měření v ose:  $x$  se dosáhlo, při  $v_c = 50 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$ , rychlosti posuvu  $v_f = 0,45 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$  a posuvu na zub  $f_z = 0,25 \text{ [mm]}$ . V ose  $x$ , která je rovna směru posuvu frézování, jde o velikosti drsností parametrů  $Ra = 0,64 \pm 0,07 \text{ [}\mu\text{m]}$  a  $Rz = 3,51 \pm 0,32 \text{ [}\mu\text{m]}$ . V ose  $y$ , která je kolmá na směr posuvu frézování, jde o velikosti drsnosti parametrů  $Ra = 0,46 \pm 0,05 \text{ [}\mu\text{m]}$  a  $Rz = 2,84 \pm 0,28 \text{ [}\mu\text{m]}$ .

Nejmenší parametry drsnosti povrchu  $Ra$  a  $Rz$  při nesousledném frézování pro měření v ose:  $x$ , vykazuje vzorek UNS R56260\_6\_80\_0,25\_N. To znamená, že nejmenší drsnosti povrchu  $Ra$  a  $Rz$  při měření v ose:  $x$  se dosáhlo, při  $v_c = 80 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$ , rychlosti posuvu  $v_f = 0,73 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$  a posuvu na zub  $f_z = 0,25 \text{ [mm]}$ . V ose  $x$ , která je rovna směru posuvu frézování, jde o velikosti drsností parametrů  $Ra = 0,87 \pm 0,06 \text{ [}\mu\text{m]}$  a  $Rz = 5,15 \pm 0,48 \text{ [}\mu\text{m]}$ . V ose  $y$ , která je kolmá na směr posuvu frézování, jde o velikosti drsností parametrů  $Ra = 0,79 \pm 0,06 \text{ [}\mu\text{m]}$  a  $Rz = 4,88 \pm 0,41 \text{ [}\mu\text{m]}$ .

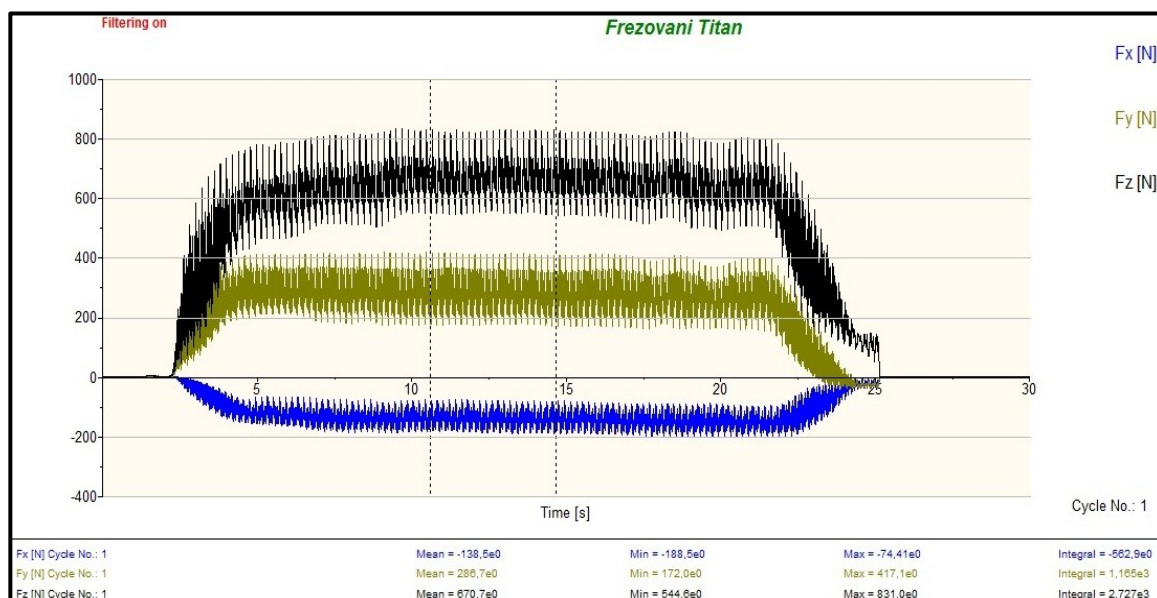
Z vyhodnocených tabulek a grafů lze vyčíst, že zvyšování posuvu na zub  $f_z \text{ [mm]}$  má největší vliv na zvyšování hodnot drsnosti  $Ra$  a  $Rz$ . Při zvyšování řezné rychlosti  $v_c \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$  dochází také k zvyšování hodnot drsnosti  $Ra$  a  $Rz$ , ale nedochází k ní v takové míře, jako u posuvu na zub  $f_z \text{ [mm]}$ . Experiment dokázal, že při sousledném frézování je dosahováno lepší kvality obrobeného povrchu než u nesousledného frézování. Všechna měření podlehla rozšířené kombinované jistotě měření  $U_C$ .

## 3.2 Vyhodnocení naměřených dat řezných sil

Experiment byl dále zkoumán na řezné síly při vysokoposuvovém čelním frézování titanové slitiny. Řezné síly byly zaznamenávány v průběhu frézování pomocí přístroje dynamometru KISTLER 9129AA, který vyhodnocuje naměřená data do složek řezných sil:  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ . Zpracovaná data byla vyhodnocena pomocí softwaru Dynoware nainstalovaného do počítače v laboratoři. Tento software umožňuje: nastavení parametrů obrábění, řízení průběhu měření a sběr dat, analýzu naměřených dat pomocí matematických a grafických funkcí, statistické hodnocení, grafické nebo tabulkové zobrazení naměřených dat, atd. Dynamometr byl upevněn k pracovnímu stolu frézovacího centra DMU 50, na který byl připevněn polotovár titanové slitiny UNS R56260. Měření řezných sil se využívá pro zlepšování a optimalizaci procesu obrábění, a to hlavně z hlediska životnosti řezných nástrojů a vibrací stroje.

Dynamometr měří řezné síly ve směrech řezných složek: [31]

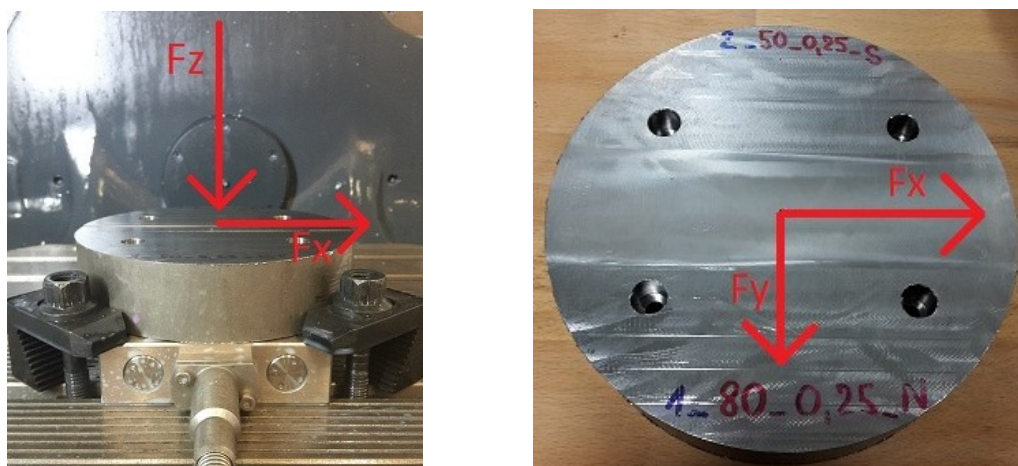
- $F_x - F_{fn}$  - jsou to řezné síly normálové, které jsou kolmé k řezné složce  $F_f$
- $F_y - F_f$  - jsou to řezné síly, které působí ve směru posuvu frézování
- $F_z - F_p$  - jsou to řezné síly pasivní



Obr. 19 Výsledkem měření je časový průběh a spektrum, které lze považovat za širokopásmový signál. Jedná se o záznam složek řezných sil vznikajících při obrábění.

### 3.3 Vyhodnocení řezných sil titanové slitiny UNS R56260

Polotovarem pro čelní vysokoposuvové frézování titanové slitiny UNS R56260 byla kruhová tyč Ø154 [mm], do které byly vyvrtány díry pro přišroubování k dynamometru Kistler 9129AA. Pro titanovou slitinu bylo navrženo celkem dvanáct různých řezných podmínek pro obrábění, viz Tab. 7, a to jak pro sousledné, tak i nesousledné frézování. Každý vzorek s danými řeznými podmínkami byl celkem osmkrát frézován. Pro vyhodnocení řezných sil byl vždy vybrán přejezd číslo: 7. Jelikož tento přejezd se jevil jako nejstabilnější, protože byl nejdelší a neobsahoval přerušovaný řez.



Obr. 20 Řezné složky  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  při frézování titanové slitiny UNS R52260

#### 3.3.1 Označení vzorků titanové slitiny UNS R56260 pro vyhodnocení řezných sil

Pro značení jednotlivých vzorků titanové slitiny byl navrhnut a zvolen následující rozlišovací systém:

**$Ti\_P7\_X1\_S(N)$**

*Ti* - titanová slitina

*P7* - číslo přejezdu

*X1÷X2* – číslo vzorku s danými řeznými parametry obrábění

*S* - sousledné frézování

*N* - nesousledné frézování

### 3.3.2 Sousedné frézování titanové slitiny UNS R56260

Hodnoty řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  byly odečteny z grafů v programu Dynoware, viz přílohy. Všechny hodnoty jsou v absolutních hodnotách.

Tab. 17 Hodnoty složek řezných sil při změně řezných podmínek odečtené z příslušných grafů pro sousledné frézování titanové slitiny UNS 56260

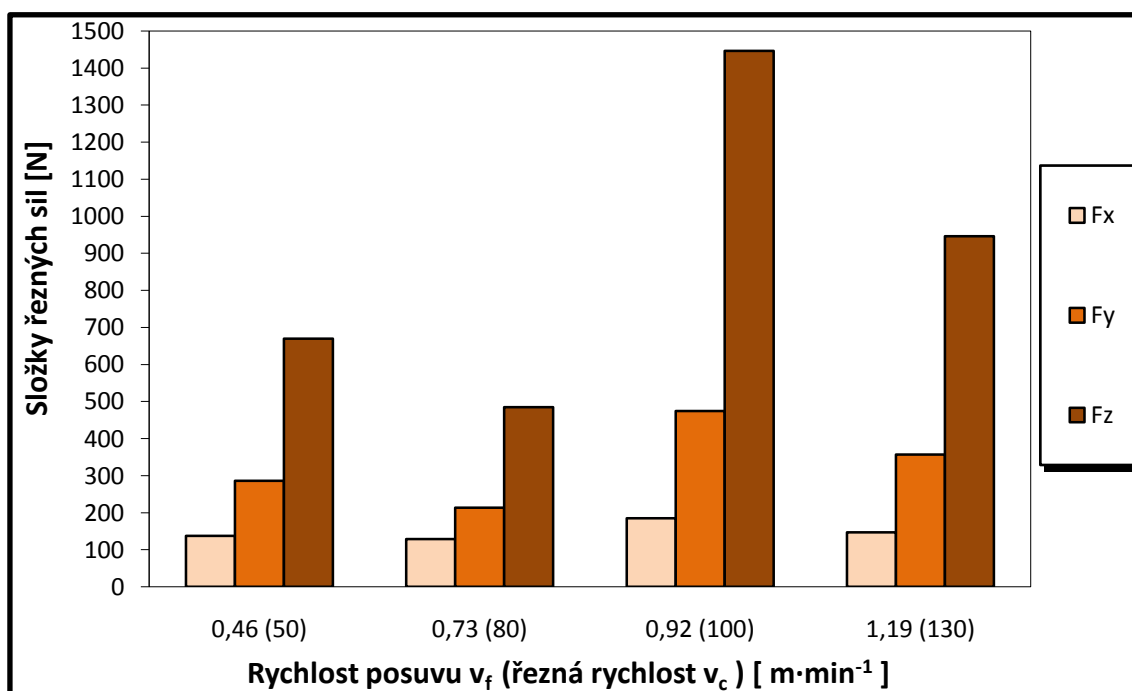
Obráběná plocha č.:	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Otáčky: $n$ [min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Složky řezných sil		
					$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
Ti_P7_X1_S	0,25	50	306	0,46	138	286	670
Ti_P7_X2_S	0,4			0,73	158	267	633
Ti_P7_X3_S	0,6			1,10	289	510	1270
Ti_P7_X4_S	0,25	80	490	0,73	129	214	485
Ti_P7_X5_S	0,4			1,18	167	340	851
Ti_P7_X6_S	0,6			1,76	251	444	1246
Ti_P7_X7_S	0,25	100	612	0,92	185	475	1446
Ti_P7_X8_S	0,4			1,47	192	346	874
Ti_P7_X9_S	0,6			2,20	279	525	1594
Ti_P7_X10_S	0,25	130	796	1,19	147	357	946
Ti_P7_X11_S	0,4			1,91	158	515	1416
Ti_P7_X12_S	0,6			2,86	202	434	1360



### 3.3.3 Vyhodnocené složky řezné síly $F_y$ , $F_x$ a $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,25$ [mm] při sousledném frézování

Tab. 18 Vypočítané složky řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  pro dané řezné parametry

Plocha č.	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Vypočtené složky řezné síly		
				$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
1	0,25	50	0,46	138	286	670
4		80	0,73	129	214	485
7		100	0,92	185	475	1446
10		130	1,19	147	357	946



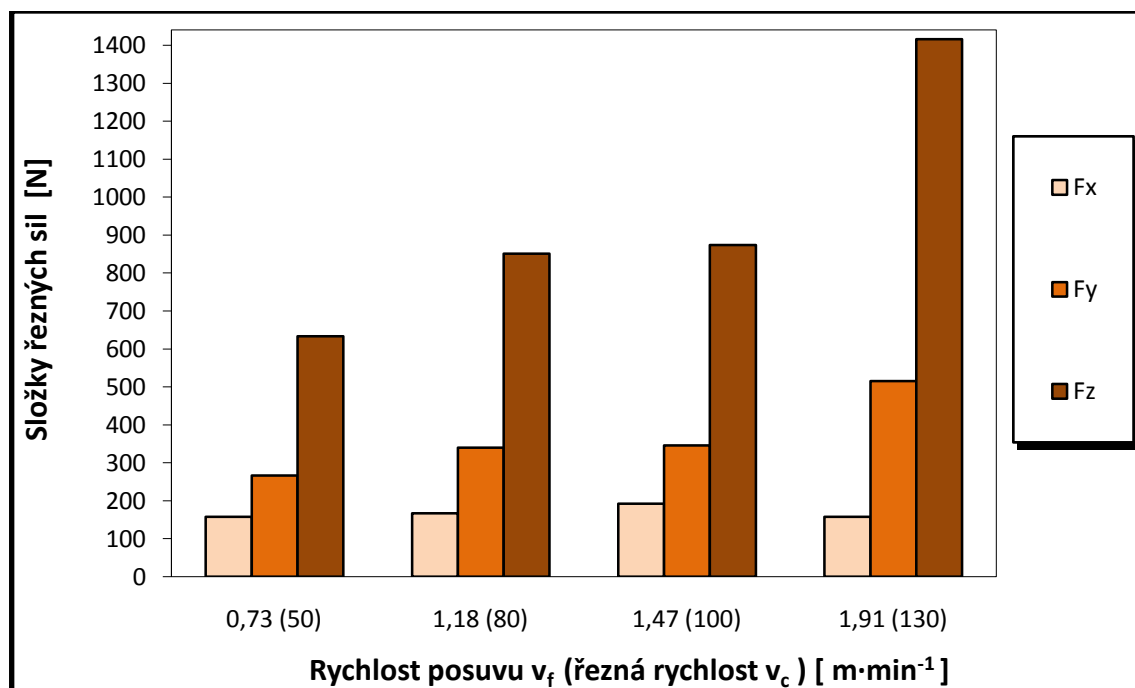
Graf 7. Průběh vypočítaných celkových složek řezných sil při konstantním posuvu na zub  $f_z$  v závislosti na rychlosti posuvu  $v_f$  a řezné rychlosti  $v_c$  při sousledném frézování

Z grafu 7. lze vyčíst, že při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,25$  [mm] jsou optimální řezné podmínky při řezné rychlosti  $v_c = 80$  [m·mm<sup>-1</sup>] a rychlosti posuvu  $v_f = 0,73$  [m·mm<sup>-1</sup>].

### 3.3.4 Vyhodnocené složky řezné síly $F_x$ , $F_y$ a $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,4$ [mm] při sousledném frézování

Tab. 19 Vypočítané složky řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  pro dané řezné parametry

Plocha č.	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Vypočtené složky řezné síly		
				$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
2	0,4	50	0,73	158	267	633
5		80	1,18	167	340	851
8		100	1,47	192	346	874
11		130	1,91	158	515	1416



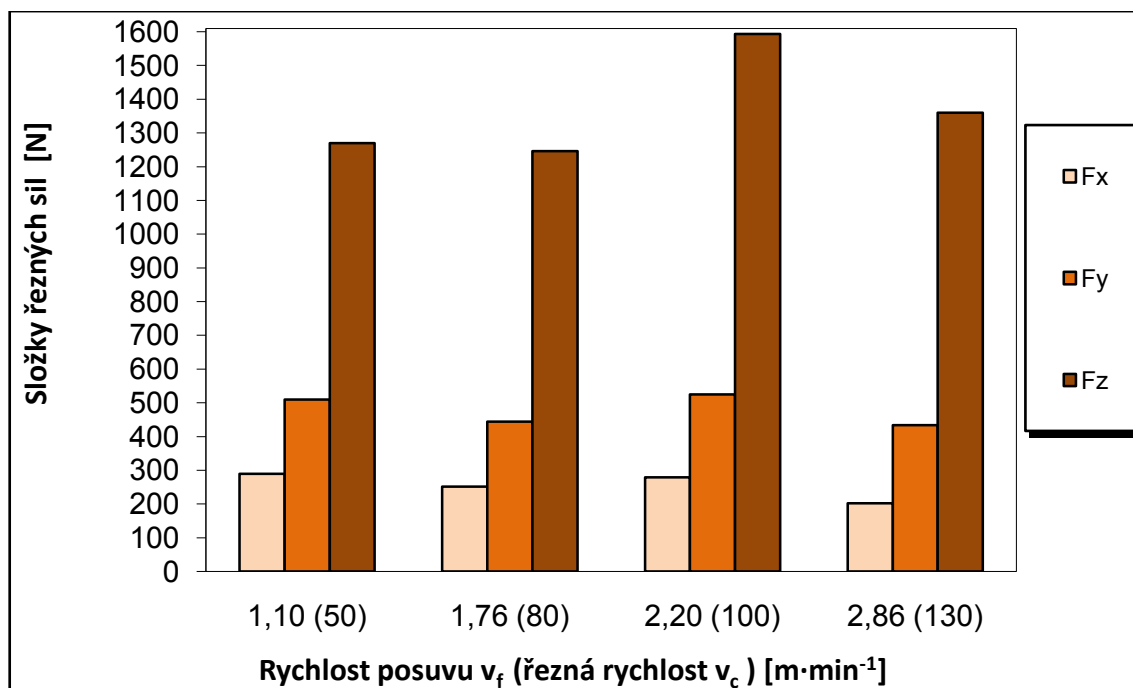
Graf 8. Průběh vypočítaných celkových složek řezných sil při konstantním posuvu na zub  $f_z$  v závislosti na rychlosti posuvu  $v_f$  a řezné rychlosti  $v_c$  při sousledném frézování

Z grafu 8. lze vyčíst, že při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,4$  [mm] jsou optimální řezné podmínky při řezné rychlosti  $v_c = 50$  [m·mm<sup>-1</sup>] a rychlosti posuvu  $v_f = 0,73$  [m·mm<sup>-1</sup>].

### 3.3.5 Vyhodnocené složky řezné síly $F_x$ , $F_y$ a $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,6$ [mm] při sousledném frézování

Tab. 20 Vypočítané složky řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  pro dané řezné parametry

Plocha č.	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Vypočtené složky řezné síly		
				$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
3	0,6	50	1,10	289	510	1270
6		80	1,76	251	444	1246
9		100	2,20	279	525	1594
12		130	2,86	202	434	1360



Graf 9. Průběh vypočítaných celkových složek řezných sil při konstantním posuvu na zub  $f_z$  v závislosti na rychlosti posuvu  $v_f$  a řezné rychlosti  $v_c$  při sousledném frézování

Z grafu 9. lze vyčíst, že při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,6$  [mm] jsou optimální řezné podmínky při řezné rychlosti  $v_c = 80$  [m·mm<sup>-1</sup>] a rychlosti posuvu  $v_f = 1,76$  [m·mm<sup>-1</sup>].

### 3.3.6 Nesousledné frézování titanové slitiny UNS R56260

Hodnoty řezných sil byly odečteny z grafů v programu Dynoware, viz přílohy. Všechny hodnoty jsou v absolutních hodnotách, kvůli snazšímu porovnání řezných sil.

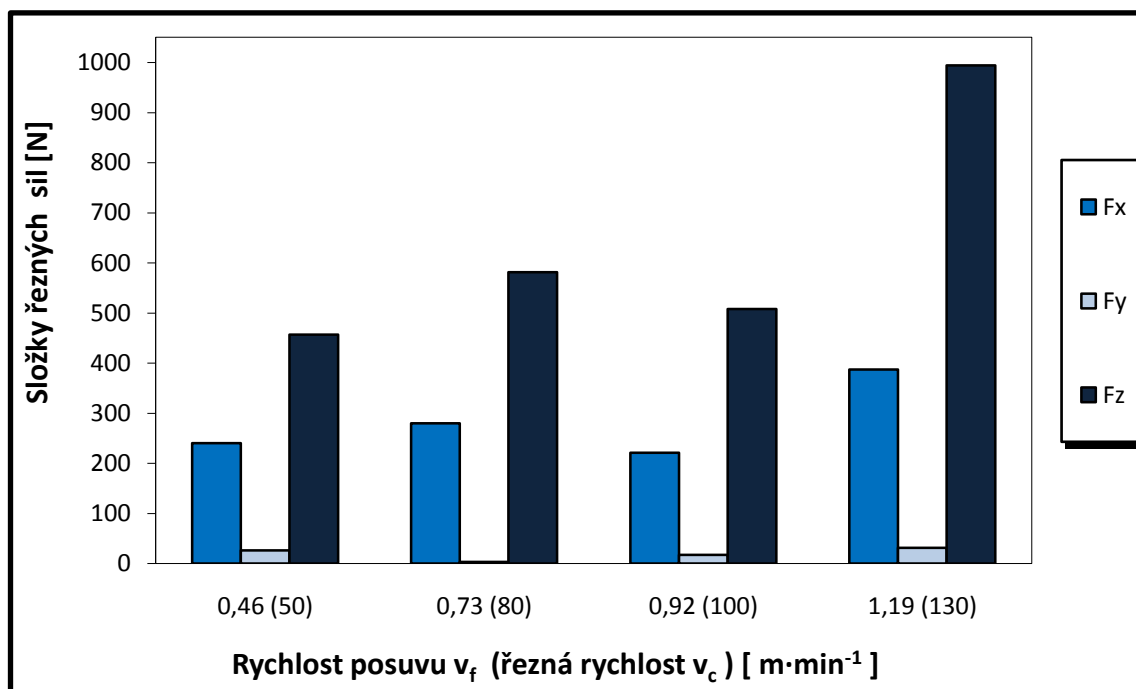
Tab. 21 Hodnoty složek řezných sil při změně řezných podmínek odečtené z příslušných grafů pro nesousledné frézování titanové slitiny UNS R56260

Obráběná plocha č.:	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Otáčky: $n$ [min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Složky řezných sil:		
					$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
Ti_P7_X1_N	0,25	50	306	0,46	240	26	457
Ti_P7_X2_N	0,4			0,73	157	213	708
Ti_P7_X3_N	0,6			1,10	448	17	952
Ti_P7_X4_N	0,25	80	490	0,73	280	3	581
Ti_P7_X5_N	0,4			1,18	378	9	750
Ti_P7_X6_N	0,6			1,76	529	5	1171
Ti_P7_X7_N	0,25	100	612	0,92	221	17	508
Ti_P7_X8_N	0,4			1,47	358	12	816
Ti_P7_X9_N	0,6			2,20	553	10	1118
Ti_P7_X10_N	0,25	130	796	1,19	387	31	994
Ti_P7_X11_N	0,4			1,91	402	40	1063
Ti_P7_X12_N	0,6			2,86	509	57	1150

### 3.3.7 Vyhodnocené složky řezné síly $F_x$ , $F_y$ a $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,25$ [mm] při nesousledném frézování

Tab. 22 Vypočítané složky řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  pro dané řezné parametry

Plocha č.	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Vypočtené složky řezné síly		
				$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
1	0,25	50	0,46	240	26	457
4		80	0,73	280	3	581
7		100	0,92	221	17	508
10		130	1,19	387	31	994



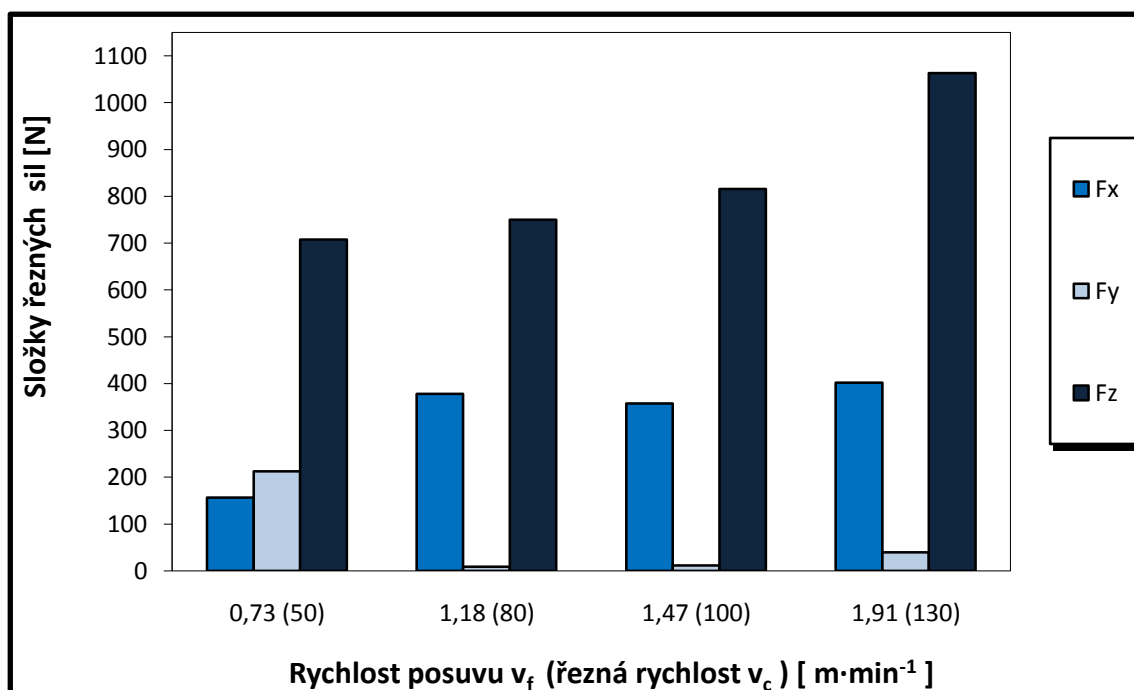
Graf 10. Průběh vypočítaných celkových složek řezných sil při konstantním posuvu na zub  $f_z$  v závislosti na rychlosti posuvu  $v_f$  a řezné rychlosti  $v_c$  při nesousledném frézování

Z grafu 10. lze vyčíst, že při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,25$  [mm] jsou optimální řezné podmínky při řezné rychlosti  $v_c = 50$  [m·mm<sup>-1</sup>] a rychlosti posuvu  $v_f = 0,46$  [m·mm<sup>-1</sup>].

### 3.3.8 Vyhodnocené složky řezné síly $F_x$ , $F_y$ a $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,4$ [mm] při nesousledném frézování

Tab. 23 Vypočítané složky řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  pro dané řezné parametry

Plocha č.	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Vypočtené složky řezné síly		
				$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
2	0,4	50	0,73	157	213	708
5		80	1,18	378	9	750
8		100	1,47	358	12	816
11		130	1,91	402	40	1063



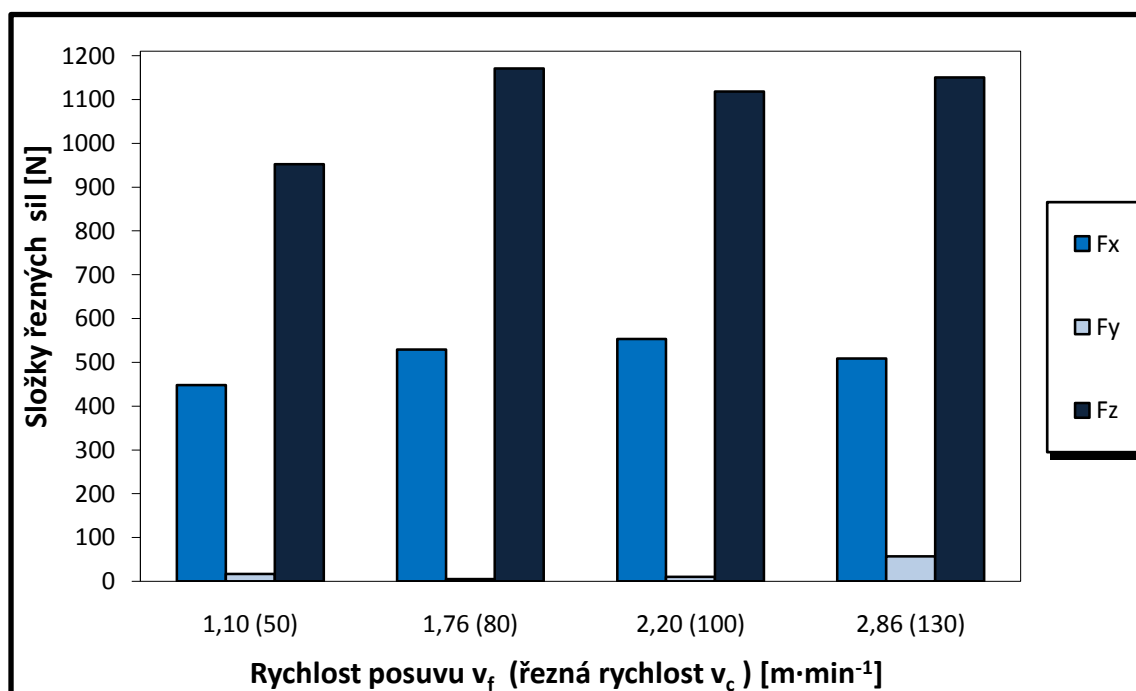
Graf 11. Průběh vypočítaných celkových složek řezných sil při konstantním posuvu na zub  $f_z$  v závislosti na rychlosti posuvu  $v_f$  a řezné rychlosti  $v_c$  při nesousledném frézování

Z grafu 11. lze vyčíst, že při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,4$  [mm] jsou optimální řezné podmínky při řezné rychlosti  $v_c = 50$  [m·mm<sup>-1</sup>] a rychlosti posuvu  $v_f = 0,73$  [m·mm<sup>-1</sup>].

### 3.3.9 Vyhodnocené složky řezné síly $F_x$ , $F_y$ a $F_z$ pro posuv na zub $f_z = 0,6$ [mm] při nesousledném frézování

Tab. 24 Vypočítané složky řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  pro dané řezné parametry

Plocha č.	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Vypočtené složky řezné síly		
				$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
3	0,6	50	1,10	448	17	952
6		80	1,76	529	5	1171
9		100	2,20	553	10	1118
12		130	2,86	509	57	1150



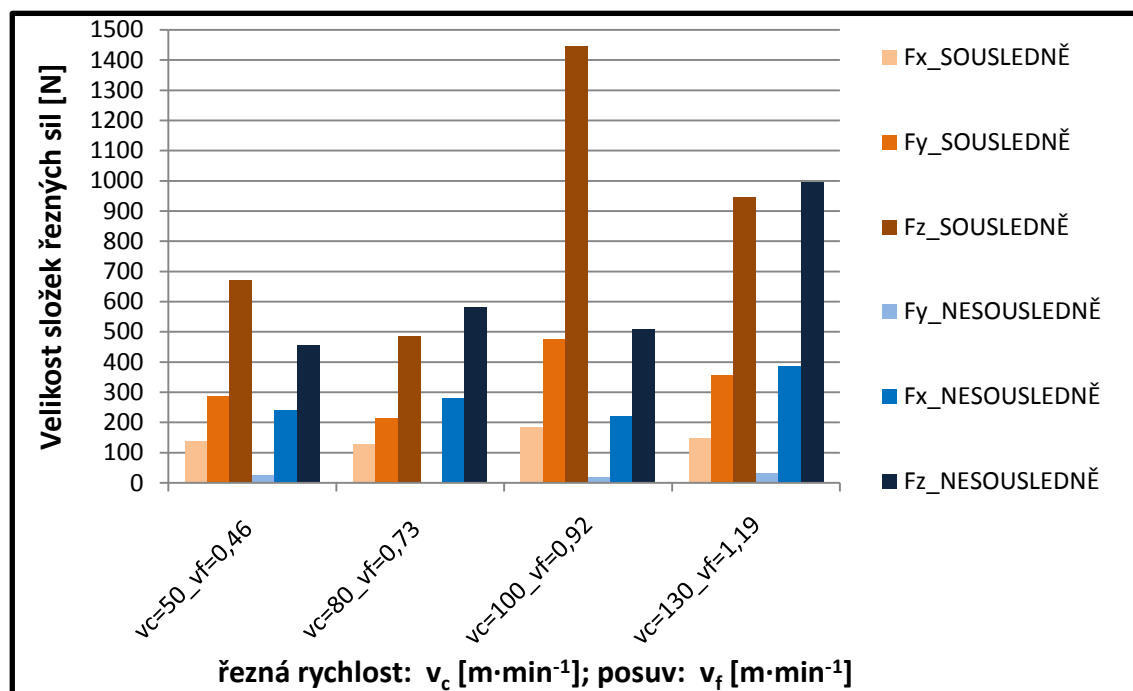
Graf 12. Průběh vypočítaných celkových složek řezných sil při konstantním posuvu na zub  $f_z$  v závislosti na rychlosti posuvu  $v_f$  a řezné rychlosti  $v_c$  při nesousledném frézování

Z grafu 12. lze vyčíst, že při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,6$  [mm] jsou optimální řezné podmínky při řezné rychlosti  $v_c = 50$  [m·mm<sup>-1</sup>] a rychlosti posuvu  $v_f = 1,10$  [m·mm<sup>-1</sup>].

### 3.3.10 Grafické porovnání sousledného a nesousledného frézování titanové slitiny UNS R56260

Tab. 25 Porovnání složek řezných sil při sousledném a nesousledném frézování při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,25$  [mm]

Obráběná plocha č.:	Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Otáčky: $n$ [min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Řezné síly - sousledné frézování			Řezné síly - nesousledné frézování		
					$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
Ti_P7_X1	50	0,25	306	0,46	138	286	670	240	26	457
Ti_P7_X4	80		490	0,73	129	214	485	280	3	581
Ti_P7_X7	100		612	1,92	185	475	1446	221	17	508
Ti_P7_X10	130		796	1,19	147	357	946	387	31	994

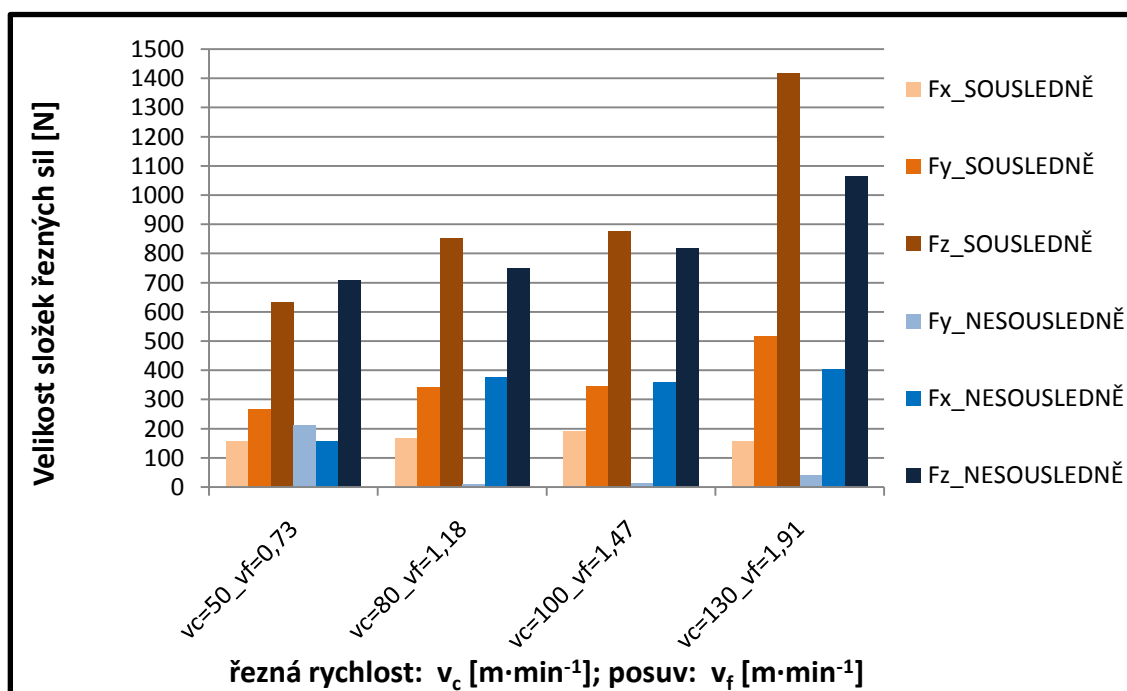


Graf 13. Porovnání složek řezných sil při sousledném a nesousledném frézování při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,25$  [mm]



Tab. 26 Porovnání složek řezných sil při sousledném a nesousledném frézování při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,4$  [mm]

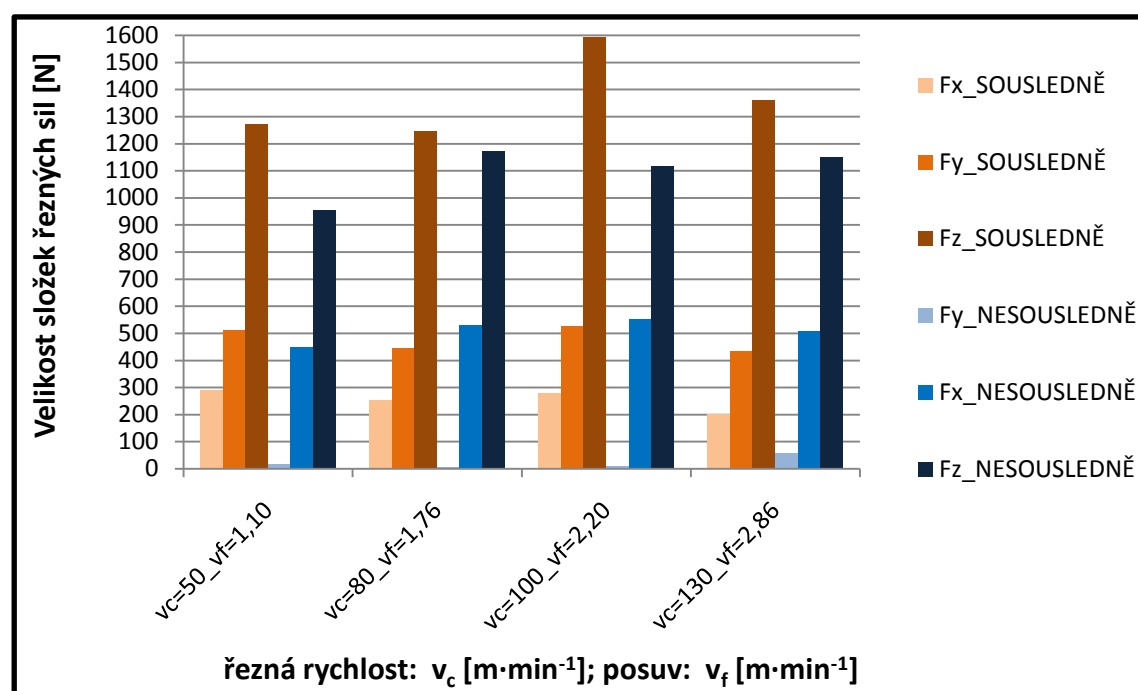
Obráběná plocha č.:	Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Otáčky: $n$ [min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Řezné síly - sousledné frézování			Řezné síly - nesousledné frézování		
					$F_x$	$F_y$	$F_z$	$F_x$	$F_y$	$F_z$
					[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]
Ti_P7_X2	50	0,4	306	0,73	158	267	633	157	213	708
Ti_P7_X5	80		490	1,18	167	340	851	378	9	750
Ti_P7_X8	100		612	1,47	192	346	874	358	12	816
Ti_P7_X11	130		796	2,20	158	515	1416	402	40	1063



Graf 14. Porovnání složek řezných sil při sousledném a nesousledném frézování při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,4$  [mm]

Tab. 27 Porovnání složek řezných sil při sousledném a nesousledném frézování při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,6$  [mm]

Obráběná plocha č.:	Řezná rychlost: $v_c$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Posuv na zub: $f_z$ [mm]	Otáčky: $n$ [min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu: $v_f$ [m·min <sup>-1</sup> ]	Řezné síly - sousledné frézování			Řezné síly - nesousledné frézování		
					$F_x$	$F_y$	$F_z$	$F_x$	$F_y$	$F_z$
					[N]	[N]	[N]	[N]	[N]	[N]
Ti_P7_X3	50	0,6	306	1,10	289	510	1270	448	17	952
Ti_P7_X6	80		490	1,76	251	444	1246	529	5	1171
Ti_P7_X9	100		612	2,20	279	525	1594	553	10	1118
Ti_P7_X12	130		796	2,86	202	434	1360	509	57	1150



Graf 15. Porovnání složek řezných sil při sousledném a nesousledném frézování při konstantním posuvu na zub  $f_z = 0,6$  [mm]

### 3.3.11 Dosažené výsledky hodnocení řezných sil pro slitinu titanu UNS R56260

Byly hodnoceny složky řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ , které odpovídají silám  $F_x$  - síla normálová,  $F_y$  - síla posuvu a  $F_z$  - síla pasivní. Porovnávalo se sousledné a nesousledné frézování a zjišťovaly se nejvhodnější řezné parametry.

Při sousledném frézování se dosáhlo nejmenších řezných sil při řezné rychlosti  $v_c = 80 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$ , posuvu na zub  $f_z = 0,25 \text{ [mm]}$  a posuvu nástroje  $v_f = 0,73 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$ , a to pro složky řezné síly:  $F_z = 485 \text{ [N]}$ ,  $F_y = 214 \text{ [N]}$  a  $F_x = 129 \text{ [N]}$ .

Při nesousledném frézování se dosáhlo nejmenších řezných sil při řezné rychlosti  $v_c = 50 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$ , posuvu na zub  $f_z = 0,25 \text{ [mm]}$  a posuvu nástroje  $v_f = 0,46 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]$ , a to pro složky řezné síly:  $F_z = 457 \text{ [N]}$ ,  $F_y = 26 \text{ [N]}$  a  $F_x = 240 \text{ [N]}$ .

Dle vypracovaných grafů lze tvrdit, že největší vliv na zvyšování složek řezných sil má posuv na zub  $f_z \text{ [mm]}$ . V porovnání sousledného a nesousledného frézování titanové slitiny UNS R56260 z hlediska řezných sil nedochází k příliš velkým rozdílům mezi těmito dvěma metodami. Ale o něco lepší a stabilnější hodnoty řezných sil vykazuje metoda nesousledného frézování. Při nesousledném frézování, dle vypracovaných grafů dochází k postupnému navyšování hodnot řezných sil při zvyšování řezných parametrů obrábění.

## 4 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo prozkoumat vysokoposuvové čelní frézování titanové slitiny UNS R56260. Tato slitina se v experimentální části práce obráběla metodou sousledného i nesousledného frézování a zjišťovaly se lepší výsledky pro navrhnuté řezné podmínky. Slitina byla obráběna na pětiosém frézovacím centru DMU 50 a nástrojem byla šestibřitá fréza osazená kruhovými vyměnitelnými břitovými destičkami. Experiment byl zaměřen na vyhodnocení naměřené drsnosti povrchu parametrů  $Ra$  a  $Rz$  a na vyhodnocení složek řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  pro sousledné a nesousledné frézování.

Při zkoumání povrchu drsnosti titanové slitiny UNS R56260 bylo zjištěno, že největší vliv na drsnost povrchu má posuv na zub  $f_z$  [mm]. V porovnání sousledné a nesousledné metody frézování bylo dále zjištěno, že lepší povrch drsnosti se dosáhne při sousledném frézování. Rozdíly parametrů drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  mezi sousledným a nesousledným frézováním vykazovaly minimální rozdíl.

Dle vyhodnocených dat řezných složek sil bylo zjištěno, že stabilnější a nižší hodnoty řezných sil jsou u nesousledného frézování. Hlavní vliv na zvyšování řezných sil má posuv na zub  $f_z$  [mm]. U nesousledného frézování dle výsledků lze lépe předpovídat hodnoty řezných sil, jelikož s navyšováním řezných parametrů rostly postupně i řezné síly.

Moderní obrábění titanových slitin v praxi vyžaduje co nejrychlejší, nejpresnější a co nejlevnější výrobu. Proto se do praxe zavádí moderní vysokorychlostní obráběcí metody. Tento experiment nevykazoval velké rozdíly mezi sousledným a nesousledným vysokoposuvovým frézováním. Ale dá se tvrdit, že výhodnější metodou pro frézování titanové slitiny UNS R56260 je nesousledné frézování, jelikož tato metoda vykazovala menší a stabilnější řezné síly a podobné hodnoty drsnosti jako sousledná metoda frézování. V praxi je nutné pečlivě zvážit strategii frézování s ohledem na ekonomičnost výroby.

## 5 Použitá literatura

- [1] KŘÍŽ, A., et al. Obrábění slitin AlSiMg0,5Mn nástroji s progresivními tenkými vrstvami [online]. 5. Mezinárodní konference Aluminium 2007. Hotel Bezděz, Staré Splavy. 21s. Dostupné z:<[http://www.ateam.zcu.cz/download/prispevek\\_07.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/prispevek_07.pdf)>
- [2] BARTHELMY, David. Mineral Species containing Titanium. In: Mineralogy database [online]. 2010 Dostupné z: <http://webmineral.com>
- [3] BEDINGER, George. Titanium mineral concretates. In: U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries. [online]. 2013. Dostupné z:<<http://minerals.usgs.gov>>
- [4] LEYENS, C., PETERS, M. Titanium and TitaniumAlloys, Fundamentals and Applications, 1. vydání, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003, ISBN 3-527-30534-3
- [5] GAZDA, M. Vysokoposuvové frézování ocelí: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 71 s. Vedoucí práce: Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
- [6] Kouřil, P. Obrábění titanových a těžkoobrobitelných slitin frézováním. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 49 s. příloh. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [7] VLK, Š. Obrábění hliníkové slitiny: diplomová práce. Ostrava VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2015, 70s. Vedoucí práce: Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
- [8] MIKEL, P. Predikce sil a kvality opracování při frézování s vysokými posuvy. Brno. 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 59 s. příloh 5. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, Csc.
- [9] Časopis o automobilovom priemysle, strojárstve a ekonomike. Aimagazine [online]. 2011, 136s, [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: [www. http://www.leaderpress.sk/sk/images/stories/archiv\\_cisel/Flash14/aimagazin.pdf](http://www.leaderpress.sk/sk/images/stories/archiv_cisel/Flash14/aimagazin.pdf)

- [10] Co zvolit pro obrábění Al slitin? MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008, [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/co-zvolit-pro-obrabeni-al-slitin.html>
- [11] Vysokorychlostní obrábění – klíč k vyšší produktivitě. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: MM publishing, s.r.o., 2010, [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vysokorychlostni-obrabeni-klic-k-vyssi-produktivite.html>
- [12] Pro obrábění hliníkových a titanových slitin: Multifunkční frézovací nástroje pro vysoké řezné rychlosti a vysoké výkony při obrábění hliníkových a titanových slitin. [online]. In: 2014, s. 20 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: [http://mhg-mediastore.net/download/B116%20AXD/B116CZ\\_AXD4000\\_7000\\_CZECH.pdf](http://mhg-mediastore.net/download/B116%20AXD/B116CZ_AXD4000_7000_CZECH.pdf)
- [13] VIJAY, S. KRISHNARAJ, V. Machining Parameters Optimization in End Milling of Ti-6Al-4V. [online]. Indie, 2013, 10 pages, [cit. 2016-04-11]. PSG College of Technology, Coimbatore, Department of Mechanical Engineering. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813017001>.
- [14] Obrábění Titanu: řešení pro lékařský průmysl [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.iscar.fr/Media/pdf/ObrabenTitanuProLekarskyPrumysl.pdf>
- [15] Obrábění titanových dílů. TechMagazín [online]. TECH MEDIA PUBLISHING, s.r.o., 2012 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/666>
- [16] ŠKORNIČKA, Stanislav. Frézování titanu na nové úrovni. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: MM publishing, s.r.o., 2010, [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-titanu-na-nove-urovni.html>
- [17] Frézování žárovzdorných slitin a titanu [online]. Praha. Sandvik CZ s.r.o. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cscz/knowledge/milling/getting\\_started/milling\\_different\\_materials/hrsa\\_and\\_titanium\\_milling](http://www.sandvik.coromant.com/cscz/knowledge/milling/getting_started/milling_different_materials/hrsa_and_titanium_milling)
- [18] Technické údaje: hliník [online]. ALUCAD Bohemia s.r.o., [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: [http://www.alucad.cz/public/var/files/file\\_109.pdf](http://www.alucad.cz/public/var/files/file_109.pdf)

- [19] Vasilko K. Obrábanie titánu a jeho sliatin. Fakulta výrobních technológií Technické university v Košicích. Prešov 2001, 120s., ISBN 80-7099-683-8.
- [20] DMU 50/70 series: CNC universal milling machines [online]. In: . Sulzerallee, Švýcarsko: DMG MORI Europe AG, s. 20 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://en.dmgmori.com/blob/123874/dde0f533146bc1c6047edc7f022b26ac/pm0uk15-dmu-50-70-pdf-data.pdf>
- [21] Mitutoyo Česko s.r.o.: Drsnoměry měření jakosti povrchu. [online]. Teplice: Česká republika, 2006 [cit. 28. Dubna 2014]. Dostupné z: <http://www.mitutoyo.cz/files/prospekty/prc1344-2.pdf>.
- [22] TITANIUM 6Al-2Sn-4Zr-6Mo: Ti 6246, (UNS R56260) [online]. In: . TitaniumEngineers, Inc., s. 2 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.titaniumengineers.com/uploads/1/7/9/5/17957627/6246datasheet.pdf>
- [23] ALLOY DATA SHEET EN AW-6082 [AlSi1MgMn]: High strength structural alloy. [online]. In: . Utrecht, Holandsko: Nedal Aluminium, 2005, [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: [http://www.nedalextrusion.com/files/9913/0678/5555/Data\\_6082.pdf](http://www.nedalextrusion.com/files/9913/0678/5555/Data_6082.pdf)
- [24] DONACHIE. Matthew J. Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park: ASM International. 2004. 381 s. ISBN 08-717-0686-5.
- [25] SEDLÁČEK, V. Únava hliníkových a titanových slitin. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1989, 351 s. ISBN 80-030-0180-3.
- [26] HM90 FAL-15 [online]. In: . ISCAR LTD, 2016 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=3105020&fnum=2684&mapp=ML&app=61&GFSTYP=m>
- [27] HM90 AXCR 1505 [online]. In: . ISCAR LTD, 2016 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/eCatalog/item.aspx?cat=5696622&fnum=1710&mapp=ML&app=69&GFSTYP=m>
- [28] Kopierfräser 5W7G [online]. In: . IngersollGmbh, 2016 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.imc-companies.com/Ingersollcatalog/Family.aspx?fnum=174&mapp=ML&app=5&GFSTYP=>

- [29] RHKW1003M0TN: neutrale Schrappgeometrie [online]. In: . IngersollGmbh, 2016 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.imc-companies.com/IngersollCatalog/Family.aspx?fnum=10098&mapp=ML&app=5&GFSTYP=M>
- [30] ROZA, Greg. Titanium [online]. 1st ed. New York: Rosen Central, 2008, 48 p. [cit. 2016-04-02]. ISBN 978-140-4214-125.
- [31] *Product Catalog: Sensors and Solutions for Cutting Force Measurement* [online]. In: . Winterthur, Switzerland: Kistler Holding AG., s. 28 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-002e-05.14.pdf>
- [32] SKOPEČEK, T., VODIČKA, J. *Základy vysokorychlostního obrábění - HSC*. Plzeň. Vydavatelství Západočeské univerzity v Plzni, 2005. s. 134. ISBN 80-7043-344-2
- [33] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York: Oxford University Press, 2005. p. 651. ISBN 0-19-514206-3
- [34] PILC, Jozef., STANČEKOVÁ, Dana., CZÁN, Andrej. *Integrita povrchu po frézování rovinných ploch čelným frézováním*. [online]. Žilina: Katedra obrabania a výrobnjej techniky. Dostupné z: <[http://integrita.zcu.cz/download/skola2/zilina\\_prez2.pdf](http://integrita.zcu.cz/download/skola2/zilina_prez2.pdf)>
- [35] POLZER, Aleš. *HFC (High Feed Cutting) – vysokoposuvové obrábění*. [online]. VUT v Brně. 2009. Dostupné z: <[http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc-obrabeni/akademie-cnc-obrabeni-13\\_8548.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc-obrabeni/akademie-cnc-obrabeni-13_8548.html)>
- [36] Miller, Todd. *Six points you must know about High- Feed Milling*. MMT MoldMaking technology. Duben 2012. [online]. Dostupné z:<<http://www.moldmakingtechnology.com/articles/six-points-you-must-know-about-high-feed-milling->>
- [37] MM Průmyslové spektrum: *Produktivnější frézování při extrémně vysokém posuvu* [online]. Praha: MM publishing, s.r.o., duben 2011. dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/produktivnejsi-frezovani-pri-extremne-vysokem-posuvu.html>>
- [38] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978–80–248–1505–3.



- [39] TICHÁ, Š. Strojírenská metrologie část 1. Ostrava: VŠB-TUO Ostrava, 2006. s. 112;ISBN 80-248-0672-1
- [40] *TungTechArticle: Do Feed for Efficient High-Feed Milling* [online]. In: . 2015 [cit. 2016-04-29]. Dostupné z: <http://magazine.todaysmotorvehicles.com/article/february-2016/combining-milling-and-broaching-for-aluminum-engine-components.aspx>
- [41] DE VOS, Patrick. *Příručka pro technology: Kompenzační přístup při frézování - poloha frézy*. MM Průmyslové spektrum [online]. MM publishing, s.r.o., 2013 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-kompenzacni-pristup-pri-frezovani-poloha-frezy.html>
- [42] *Poloha frézy vůči obrobku* [online]. In: . Sandvik Coromant [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting\\_started/general\\_guidelines/cutter\\_position](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/cutter_position)
- [43] HUMÁR, A. *Technologie I - Technologie obrábění - 1. část*. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2003. [online]. Dostupné na www: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)
- [44] *Příručka pro technology: Jak je to s řeznými silami?* MM Průmyslové spektrum [online]. MM publishing, s.r.o., 2012 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami.html>

## 6 Přílohy

### PŘÍLOHA A

Graficky vyhodnocené naměřené složky řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  v programu Dynoware při sousledném frézování.

### PŘÍLOHA B

Graficky vyhodnocené naměřené složky řezných sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  v programu Dynoware při nesousledném frézování.

### PŘÍLOHA C

Porovnání vyhodnocených hodnot parametrů drsnosti povrchu  $Ra$  [ $\mu\text{m}$ ] a  $Rz$  [ $\mu\text{m}$ ] a jejich rozšířené kombinované nejistoty měření  $U_C$ , při sousledném frézování a konstantní řezné rychlosti  $v_c$  [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ].

### PŘÍLOHA D

Porovnání vyhodnocených hodnot parametrů drsnosti povrchu  $Ra$  [ $\mu\text{m}$ ] a  $Rz$  [ $\mu\text{m}$ ] a jejich rozšířené kombinované nejistoty měření  $U_C$ , při nesousledném frézování a konstantní řezné rychlosti  $v_c$  [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ].

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat své vedoucí diplomové práce doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D. za připomínky, ochotu a strávený čas, který věnovala při vedení mé diplomové práce.

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2016/172 Vliv technologických parametrů na obrobený povrch a SP2016/174 Studium procesu obrábění progresivních materiálů s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.